

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO
CAMPUS BAIXADA SANTISTA
ENGENHARIA AMBIENTAL

Gabriela Nunes Rodrigues

**TIJOLO ECOLÓGICO PRODUZIDO COM RESÍDUO DA INDÚSTRIA DE
CLORO E SODA CÁUSTICA**

SANTOS – SP

2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por me guiar e por me dar esta oportunidade.

À minha mãe por me apoiar em todos os momentos.

À minha orientadora prof^a. Juliana Petermann Moretti, por me acompanhar, acolher e tornar esse experimento possível.

Ao meu coorientador prof^o. Eduardo Penteado por me guiar nos momentos de escolha do tema do meu TCC.

Às minhas amigas Amanda, Evelin e Isadora por me darem força e me acompanharem nesta jornada chamada universidade.

Ao meu chefe Eng^o Ricardo Duarte Barreto por me incentivar e apoiar minha carreira acadêmica.

À empresa UNIPAR Carbocloro e ao Eng^o Luis Carlos Villar Gulin por fornecerem o material para o presente estudo, bem como análises no laboratório, auxílio na coleta dos materiais, profissionais de outras áreas que contribuíram na burocracia do envio do resíduo.

Aos meus colegas João Victor Andrade e Leonardo Andalaft e a todos os funcionários UNIPAR Carbocloro e do laboratório por me auxiliarem nos estudos e análises realizadas na empresa.

A todos os técnicos, professores e companheiros do Departamento de Engenharia Civil (DECIV), Laboratório de Materiais e Componentes (LMC), ao Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE) e ao Laboratório de Solos da UFSCAR onde pude realizar os experimentos laboratoriais para este trabalho.

À UNIFESP, por ser o local onde eu passei meus anos de formação acadêmica, onde encontrei professores e funcionários sempre dispostos a me ensinar e ajudar e amigos que viveram momentos especiais comigo.

E agradeço a todos que me apoiaram ou estiveram envolvidos de alguma forma na realização deste projeto.

Não há céus sem tempestades, nem caminhos sem acidentes. Comédia e drama, sorrisos e lágrimas, aplausos e vaias, alternam-se na vida de qualquer um, sejam psiquiatras e pacientes, generais e soldados, intelectuais e iletrados. O importante não é atravessar o caos, mas o que fazer com ele.

Augusto Cury

RESUMO

A indústria de cloro e soda cáustica é considerada base para o setor químico mundial. Atualmente, existem três tecnologias utilizadas para a fabricação de cloro e soda cáustica: células de mercúrio, células de membrana e células de diafragma. Estes processos utilizam as como principais matérias primas água, sal e energia elétrica, produzindo cloro, hidrogênio e soda cáustica. Dentre os três, o processo de células de diafragma é o processo mais utilizado no Brasil e no mundo neste setor, e devido a isso, gera grandes quantidades de resíduos. O resíduo gerado em maior quantidade por esta tecnologia é proveniente do tratamento da salmoura e é chamado lama de salmoura diafragma. Ele apresenta textura argilosa e é classificado como resíduo classe IIA (não perigoso e não inerte). De acordo com dados obtidos na indústria brasileira UNIPAR Carbocloro, foi gerado em média 712 toneladas (2019) desse material, e atualmente o mesmo é disposto em aterros industriais. Visando encontrar uma alternativa sustentável a esse resíduo, o objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de aplicação da lama de salmoura na composição de tijolos de solo-cimento, segundo a NBR 10.836/2013. Para tanto, este estudo foi desenvolvido em três etapas principais: na primeira etapa foi realizada a coleta e preparo da lama de salmoura e do solo; na segunda etapa foi realizada a caracterização dos materiais; e na terceira etapa realizou-se a definição dos traços, moldagem, e caracterização das amostras por meio dos ensaios de resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios e massa específica. Foram definidos dois traços para a moldagem, um na proporção (em massa) 30/70, sendo 30% resíduo e 70% solo e o outro na proporção (em massa) 50/50, sendo 50% resíduo e 50% solo. A caracterização dos materiais se mostraram complementares em suas propriedades e o traço 30/70 atendeu às exigências das normas quanto aos ensaios de absorção de água e resistência à compressão. Os sais presentes na composição da lama podem ser prejudiciais diante da ação de intempéries, logo, é fundamental novos estudos para analisar o comportamento mecânico do resíduo lavado e com os teores de sais reduzidos.

PALAVRAS-CHAVE

Lama de salmoura diafragma, tijolo solo-cimento, resíduos sólidos industriais.

ABSTRACT

The chlorine and caustic soda industry is considered a base for the global chemical sector. Currently, there are three technologies used for the manufacture of chlorine and caustic soda: mercury cells, membrane cells and diaphragm cells. These processes use the main materials water, salt and electricity, producing chlorine, hydrogen and caustic soda. Among the three, the diaphragm cell process is the most used process in Brazil and worldwide in this sector, and because of this, it generates large amounts of waste. The waste generated in greater quantity by this technology comes from the treatment of brine and is called diaphragm brine sludge. This material has a clay texture and is classified as class IIA waste (non-hazardous and non-inert). According to data obtained in the Brazilian industry UNIPAR Carbocloro, an average of 712 tons (2019) of this material was generated, and it is currently disposed in industrial landfills. Aiming to find a sustainable alternative to this residue, the objective of this work was to evaluate the potential application of diaphragm brine sludge in the composition of soil-cement bricks, according to NBR 10.836 / 2013. Therefore, this study was developed in three main stages. In the first stage, the collection and preparation of diaphragm brine sludge and soil was carried out. In the second stage, the materials were characterized. Finally, in the third stage, the mix proportion, molding, and specimens characterization were conducted by the following tests: compression resistance, water absorption, voids index and specific mass. Two groups were defined for the molding, one in the proportion (by mass) 30/70, being 30% waste and 70% soil and the other in the proportion (by mass) 50/50, being 50% waste and 50% soil. The characterization of the materials if differentiated in their properties and the 30/70 line met the requirements of the standards regarding the tests of water absorption and compressive resistance. The salts present in the diaphragm brine sludge composition can be harmful in the face of the action of bad weather, therefore, they are new fundamental studies to analyze the mechanical mechanism of the washed residue and with the reduced levels of salts.

KEY –WORDS

Diaphragm Brine sludge, Soil-cement bricks, Industrial Solid Waste.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	2
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	10
1. INTRODUÇÃO	11
1.1. Objetivos	12
1.1.1. Objetivo geral	12
1.1.2. Objetivos específicos	12
2. A INDÚSTRIA DE CLORO-SODA	13
2.1. Eletrólise	14
2.2. Tecnologias Utilizadas	15
2.2.1. Processo De Produção Das Células Eletrolíticas Diafragma	16
2.2.2. Lama De Salmoura Diafragma	17
2.2.3. Processo De Geração Da Lama De Salmoura Diafragma	19
2.3. TIJOLOS SOLO-CIMENTO	21
2.4. Solos	22
2.5. Estabilizantes	24
2.6. Cimento	25
2.7. Água	25
2.8. Umidade Ideal	25
3. RESÍDUOS INCORPORADOS EM TIJOLOS DE SOLO CIMENTO	27
4. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	29
4.1. Coleta e preparo dos materiais	29
4.1.1. Solo	29
4.1.2. Lama de salmoura diafragma	30
4.2. Caracterização dos materiais	32

4.2.1.	Análise granulométrica	32
4.2.2.	Massa específica	34
4.2.3.	Limites de consistência	35
4.2.4.	Limite de liquidez	35
4.2.5.	Limite de plasticidade	37
4.2.6.	Teor de umidade	38
4.2.7.	Determinação dos sais na lama de salmoura	38
4.2.8.	Corrosividade	39
4.3.	Moldagem dos corpos de prova	39
4.4.	Ensaio de absorção de água e densidade.	42
4.5.	Ensaio de resistência à compressão	43
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1.	Caracterização dos materiais	45
5.1.1.	Limites de Consistência	45
5.1.2.	Teor de umidade	47
5.1.3.	Massa específica	47
5.1.4.	Distribuição Granulométrica	47
5.1.5.	Análise dos traços	50
5.2.	Determinação do teor de sais na lama	50
5.3.	Corrosividade	51
5.4.	Absorção de água e massa específica.	51
5.5.	Ensaio de Resistência à Compressão	53
6.	CONCLUSÕES	55
6.1.1.	Sugestões para estudos futuros	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cadeia produtiva de cloro-soda	13
Figura 2 - A Banco de Células de Griesheim. C: Sessão transversal da célula de Griesheim electorn. A: ânodo; b: entrada de salmoura; e: cátodo; d: saída de salmoura; e: saída da soda caústica; s: vapor.	16
Figura 3: Processo eletrolítico de células diafragma	16
Figura 4: Processo de fabricação de cloro e soda cáustica utilizando a tecnologia de células diafragma	20
Figura 5 Taipa de pilão e parede de solo-cimento ensacado	21
Figura 6: Origem do solo (Santos – SP).	29
Figura 7- Escavação em obra residencial (a), material coletado para ensaios em laboratório (b), areia seca (c)	30
Figura 8: Beneficiamento da lama a) Lama de salmoura in natura, b) moinho de mandíbulas e c) lama seca e destorroadada	31
Figura 9: Solução defloculante	32
Figura 10 – Análise Granulométrica a) Materiais em repouso com o defloculante. b, c e d) ensaio de granulometria por sedimentação no solo	33
Figura 11 - Ensaio de limite de liquidez. a) homogeneização do material com água destilada, b) ranhura na amostra ao logo do eixo y e c) giro da manivela do aparelho Casagrande.	36
Figura 12 - Aspecto da ranhura no aparelho Casagrande após golpes. a) visão superior e b) secções do aparelho Casagrande	36
Figura 13 - Ensaio de limite de plasticidade. a) Fricção e moldagem do solo em cilindros e b) cápsulas identificadas para serem levadas à estufa	37
Figura 14 - Determinação dos sais na lama. a) lama sendo filtrada em provetas graduadas e b) sal remanescente no recipiente após seco em estufa	38
Figura 15 - Determinação do pH da lama. a) medição do pH no pHmetro e b) amostras 1 e 2	39
Figura 16 - Teste de umidade ótima a) marca dos dedos e b) solo esfarelado mostrando o comportamento do solo e a umidade ótima.	40
Figura 17 - Moldagem dos corpos de prova. a) mistura dos materiais, b) capsulas cilíndricas e c) soquete padrão mini proctor	41

Figura 18 - Corpos de prova moldados e prontos para cura de 7 dias. a) traço 30/70 e b) traço 50/50	41
Figura 19 - Corpo de prova pronto para testes de resistência física	42
Figura 20 - Capeamento dos corpos de prova com cimento	43
Figura 21 - Imersão para ensaio de resistência à compressão	43
Figura 22 - Ensaio de resistência à compressão	44
Figura 23 - Limite de Liquidez da Lama	46
Figura 24 - Índice de plasticidade	46
Figura 25 - Curva granulométrica do solo	48
Figura 26 - Curva granulométrica da lama	48
Figura 27 - Resultados ensaios de absorção de água e massa específica	52
Figura 28 - Ensaio de resistência à compressão	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição da lama de salmoura diafragma – Laudo de análise CETESB	18
Tabela 2 - Composição da lama de salmoura diafragma	18
Tabela 3 - Resultados da lavagem da lama de salmoura para NaCl (%)	19
Tabela 4 - Proporções sugeridas para composição de solo de tijolos ecológicos de acordo com cada autor	24
Tabela 5 - Composição dos traços	40
Tabela 6 - Resultados ensaio de Limites de Consistência	45
Tabela 7 - Teor de umidade dos materiais	47
Tabela 8 - Massa específica dos materiais	47
Tabela 9 - Resultados ensaio de granulometria	49
Tabela 10 - Composição dos corpos de prova em %	50
Tabela 11 - Resultados determinação e sais na lama	50
Tabela 12 – Teste de corrosividade (pH da lama)	51
Tabela 13 - Resultados obtidos para absorção de água e compressão aos 7 dias.	51
Tabela 14 - Resultados ensaio de resistência à compressão	53

1. INTRODUÇÃO

A motivação que fundamenta esta pesquisa é a potencialidade de aplicação do resíduo de lama de salmoura diafragma em tijolos de solo cimento. Este resíduo é proveniente da indústria de cloro e soda cáustica e é gerado continuamente em todo o mundo. O que motivou também este trabalho é a investigação exploratória de um resíduo que possui fontes escassas na literatura acadêmica. Devido a este desafio, procurou-se referências bibliográficas sobre o uso de materiais com propriedades físicas similares, a fim de comparação de resultados.

Neste contexto, alguns pesquisadores (RODRIGUES e HOLANDA, 2013; JÚNIOR, *et. al.* 2010; SOUZA, 2006; RODRIGUES, 2019) obtiveram resultados positivos na incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) e de esgoto (ETE) em tijolos de solo-cimento. Surge então, uma alternativa inovadora para este resíduo que possa mitigar o envio e uso insustentável de aterros sanitários industriais.

A lama de salmoura diafragma é gerada a partir do processo de purificação da salmoura (água com sal) que é enviada para o processo de eletrólise. Este processo pode ocorrer em três tecnologias diferentes: mercúrio, membrana e diafragma. Em qualquer uma dessas tecnologias, a reação química entre a salmoura e a energia elétrica gera concomitantemente cloro, soda cáustica e hidrogênio, produtos considerados base para fabricação e diversos produtos do cotidiano moderno.

Os produtos derivados direta e/ou indiretamente do cloro e da soda são diversos, dentre os principais são: defensivos agrícolas, produtos farmacêuticos, produtos de higiene, PVC (ou cloreto de vinila) que é um material de vasta utilização como tubos, eletrodutos, materiais hospitalares, geomembranas, entre outros (FERNANDES, 2009). Além destas aplicações, o cloro destaca-se por possuir grande importância na sociedade moderna devido ao seu uso no tratamento e desinfecção da água para o consumo humano (ABICLOR, 2020). Sendo assim, a indústria de cloro e soda cáustica é considerada base para o setor químico mundial (ANDRADE, 1994).

Apesar das indústrias de peso global contarem com diversos sistemas de tratamento e monitoramento ambiental de seus resíduos, cada vez mais esse controle dos agentes poluidores requer elevado consumo energético e investimentos financeiros. SILVA (2016),

em seus estudos, aponta que tijolos de solo-cimento ou tijolos ecológicos podem ser uma alternativa para a destinação de resíduos industriais.

O tijolo de solo cimento é proveniente da mistura de solo (arenoso e argiloso), cimento e água e é fabricado em moldes por meio de prensagem, seguido de seu desmolde imediato. Esta técnica é uma alternativa de baixo impacto ambiental uma vez que não passa pelo processo de queima como a produção de tijolo tradicional.

Logo, observa-se que através de alternativas de destinação sustentáveis dos resíduos industriais é possível contribuir para a diminuição dos impactos ambientais que aterros sanitários geram no meio urbano, e assim, melhorar a qualidade do meio ambiente e das pessoas que vivem ali.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é investigar a aplicabilidade e o reaproveitamento deste resíduo em tijolos ecológicos de solo-cimento

1.1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste estudo são:

1. Avaliar as características da lama de salmoura para aplicação em tijolos ecológicos;
2. Avaliar as propriedades físicas e mecânicas de corpos de prova de solo cimento produzidos com a incorporação da lama de salmoura diafragma.

2. A INDÚSTRIA DE CLORO-SODA

O cloro e a soda cáustica estão entre os 10 principais produtos químicos produzidos no mundo e estão envolvidos na fabricação de uma gama de produtos que são utilizados no dia-a-dia (O'BRIEN, 2005). Entre os principais estão os produtos farmacêuticos, detergentes, produtos de higiene, desinfetantes, herbicidas, pesticidas e plásticos.

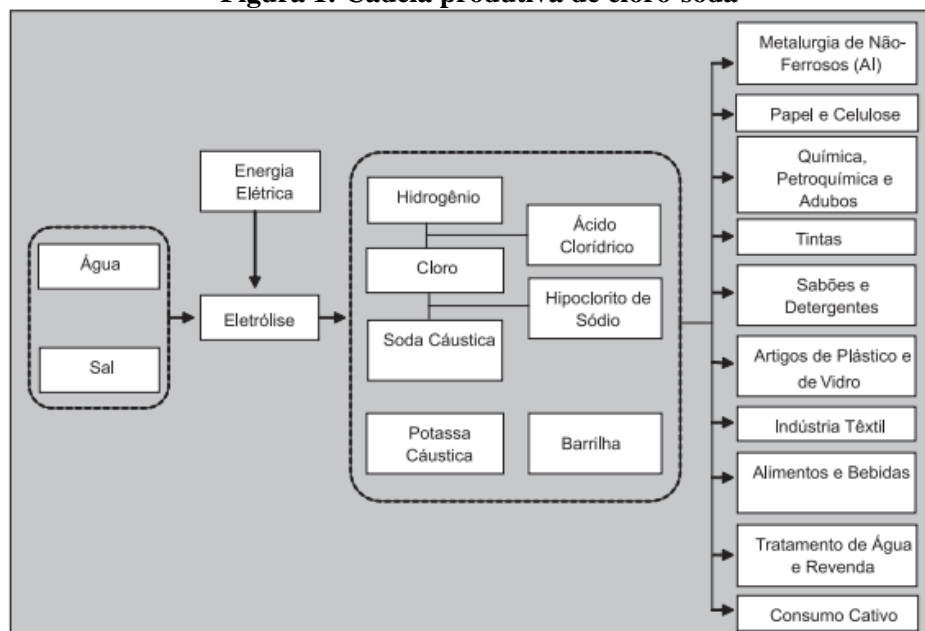
A capacidade de produção mundial de cloro atingiu 53 milhões de toneladas em 2002 comparado com uma produção de 22 milhões de toneladas em 1970 (O'BRIEN, 2005). O cloro é produzido na forma gasosa e vendido na forma líquida, e a soda cáustica é vendida como soda rayon (concentração 50%), como grânulos ou flocos anidros. Há também um mercado significativo de soda cáustica na faixa de concentração de 33% e 100%.

O cloro é usado desde 1908 no tratamento de água e no saneamento básico, devido ao seu poder bactericida (ABICLOR, 2008). A principal aplicação industrial do cloro é no tratamento de água e no Brasil, 98% deste tratamento utiliza cloro. Destaca-se também a aplicação na fabricação de PVC (policloreto de vinila), que é um termoplástico muito versátil, utilizado principalmente em tubulações e tem sido um desinfetante comum em residências e comércios. Ainda é usado no setor de saneamento e tratamento de esgoto e por causa desse uso específico do cloro, doenças transmitidas pela água, como febre tifóide e cólera, foram erradicadas no mundo industrializado.

Os usos da soda cáustica são mais variados do que os usos do cloro e seu uso extensivo está associado com a capacidade de neutralizar ácidos, por ser uma base forte, e na capacidade de reagir com alguns metais e óxidos. Em indústrias, é utilizado em sistemas que neutralizam as emissões de gases ácidos de chaminés e também utilizado na fabricação de sabão e detergente, tecidos de algodão, operações de petróleo, gás natural e alumina, entre outros.

Apesar de diferentes, estes dois produtos são enfocados concomitantemente, pois são gerados ao mesmo tempo. No processo de fabricação, a soda é coproduzida com o cloro, em uma proporção de 1 tonelada de cloro para 1,12 toneladas de soda cáustica (FERNANDES, 2009). Os principais produtos obtidos na cadeia produtiva deste setor são: cloro líquido (Cl_2), hidrogênio gasoso (H_2), soda cáustica (NaOH), 1,2-dicloroetano (EDC), ácido clorídrico (HCl) e hipoclorito de sódio (NaClO) (**Figura 1**).

Figura 1: Cadeia produtiva de cloro-soda



Fonte: FERNANDES, 2009

2.1. Eletrólise

Eletrólise é o termo dado ao processo pelo qual um composto se decompõe, quando em solução, há a passagem de uma corrente elétrica por ele (HALE, 1918). Em 1880, Humphry Davy e Michael Faraday perceberam que a decomposição eletrolítica de substâncias era de importância industrial e que a aplicação da eletrólise poderia ser amplamente utilizada na indústria química.

Quando uma corrente elétrica atravessa uma solução (um condutor líquido), sua passagem é acompanhada pela decomposição da substância. O líquido é denominado eletrólito, e os terminais imersos nele, pelos quais a corrente entra e sai, são denominados eletrodos. Esse eletrodo que é conectado ao pólo positivo da bateria ou gerador é o ânodo, e o outro, que é conectada ao pólo negativo da fonte de corrente, é conhecida como cátodo.

Considera-se que a corrente entra no eletrólito no ânodo e sai no cátodo. Ao eletrolisar uma solução aquosa de sulfato de cobre entre os eletrodos de platina, o cobre metálico é depositado no cátodo enquanto o oxigênio é desenvolvido no ânodo. Alguns exemplos comuns de aplicação da eletrólise são a decomposição da água acidificada transformando-se em hidrogênio no cátodo e oxigênio no ânodo e do cloreto de sódio, tema deste estudo, no qual sua decomposição resulta em hidrogênio no cátodo, e cloro no ânodo (HALE, 1918).

2.2. Tecnologias Utilizadas

As três tecnologias citadas anteriormente, células diafragma, células de mercúrio e células de membrana funcionam a partir do processo de eletrólise e possuem células (ou cubas) eletrolíticas que recebem as matérias primas sal, água e eletricidade onde ocorre a quebra dos compostos gerando cloro, soda cáustica e hidrogênio.

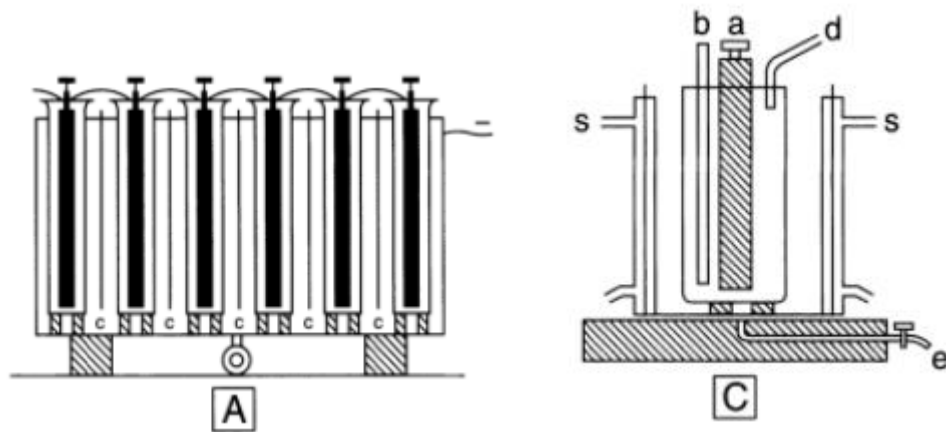
As células de mercúrio é o processo mais antigo e considerado de alta eficiência, pois gera soda cáustica de alta pureza e praticamente não gera resíduo sólido (FERNANDES, 2009). Essa tecnologia possui maior potencial poluidor diante das três tecnologias devido a emissões de efluentes gasosos e líquidos contendo mercúrio. Em contrapartida, há tecnologias adequadas que devem ser utilizadas para tratar e minimizar os impactos gerados pelas emissões gasosas e efluente líquidos que são produzidos nesta tecnologia.

No Brasil, este processo produtivo terá seu “phase-out”, ou seja, sua eliminação, em 2025, devido a promulgação da “Convenção de Minamata” através do decreto 9.470/2018 que estabelece data limite para eliminar atividades que utilizam mercúrio em seu processo, em prol da saúde do ser humano e do meio ambiente.

A tecnologia de células de membrana é a mais moderna e não poluente (FERNANDES, 2009). Este processo possui qualidade dos produtos, similar aos obtidos por células de mercúrio, porém a concentração da soda cáustica produzida é menor, necessitando uma posterior concentração.

As células diafragma contém uma tela porosa em seu interior que impede as reações paralelas e secundárias como o hipoclorito de sódio. Os produtos deste processo não são definitivos, ou seja, exige concentração posterior da soda cáustica. As matérias-primas do processo precisam ser de alta pureza, para isso é preciso que a salmoura recebida seja filtrada previamente. O processo de filtragem desta salmoura gera como resíduo sólido em grande quantidade chamado lama de salmoura diafragma (**Figura 2**).

Figura 2 - A Banco de Células de Griesheim. C: Sessão transversal da célula de Griesheim electorn. A: ânodo; b: entrada de salmoura; e: cátodo; d: saída de salmoura; e: saída da soda cáustica; s: vapor.



Fonte: HALE, 1918

2.2.1. Processo De Produção Das Células Eletrolíticas Diafragma

No processo de células diafragma, a célula eletrolítica é dividida em dois compartimentos internos que são separados por um diafragma poroso que funciona como um separador entre cátodo e ânodo e permite a passagem de íons. Nesses compartimentos são recebidos solução de salmoura tratada e energia elétrica. A salmoura entra no compartimento anódico, onde é produzido o cloro gás (Cl_2), e flui através do diafragma para o compartimento catódico, onde são gerados o hidróxido de sódio (NaOH) e o hidrogênio (H_2) simultaneamente (ABICLOR) (**Figura 3**). A reação que ocorre encontra-se descrita abaixo:

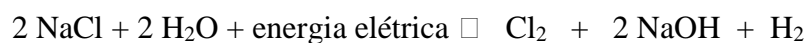
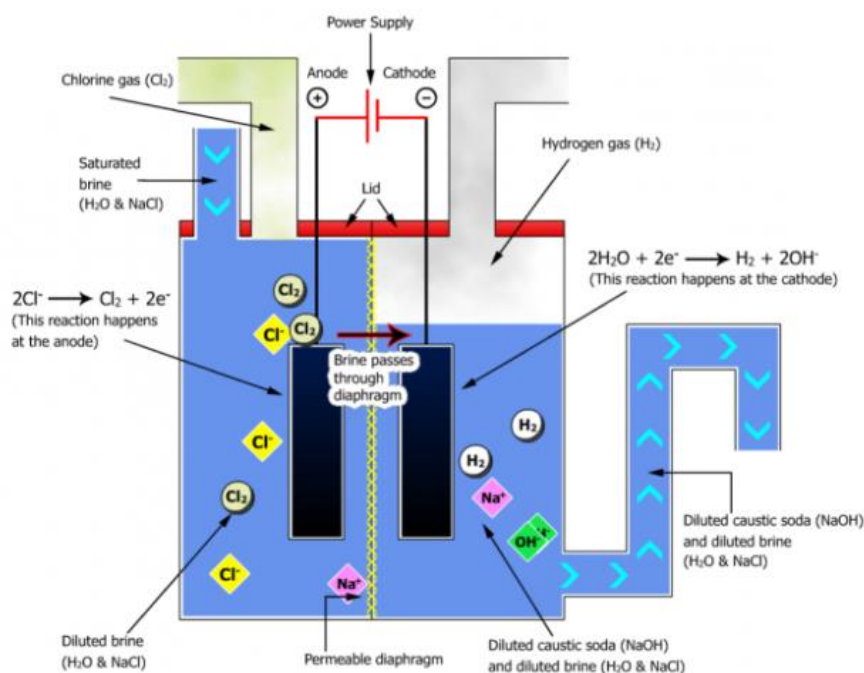


Figura 3: Processo eletrolítico de células diafragma



Fonte: ABICLOR.COM.BR

Ao saírem do processo de células diafragma, os produtos seguem para as etapas subsequentes de produção. O cloro é enviado para a secagem, compressão e liquefação, o hidrogênio é lavado e enviado para a produção de ácido clorídrico e o hidróxido de sódio é enviado a um tanque de estocagem, onde a solução é concentrada configurando-se na soda cáustica comercial.

2.2.2. Lama De Salmoura Diafragma

A lama de salmoura diafragma é um dos resíduos gerados em maior quantidade nas plantas de cloro soda. É estimada uma produção de 712 toneladas (2019) deste resíduo, baseado na produção de indústria química brasileira em estudo, UNIPAR Carbocloro. O custo aproximado para destinação deste resíduo é de R\$ 151.846,29 (2019) incluindo transporte e disposição final em aterro.

A classificação de resíduos sólidos é regida pela NBR 10004 (ABNT, 2004) da Associação Brasileira de Normas Técnicas e envolve a identificação e caracterização do resíduo de acordo com as matérias-primas, insumos e processos que lhe deu origem. Os resíduos sólidos são classificados em dois grupos – Classe I (perigosos) e Classe II (não perigosos), e este último grupo subdivide-se em dois: Classe IIA (não inertes) e classe II B (inertes).

Os resíduos são classificados como perigosos se tiverem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade e patogenicidade. Em caso de não haver, são considerados não perigosos para à saúde pública e ao meio ambiente.

O resíduo de lama de salmoura diafragma, é classificado, de acordo com suas propriedades químicas, como resíduo classe IIA – não perigoso de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), e é disposto em aterro industrial. O laudo de análise exigido pela CETESB para a análise e emissão do Certificado de Movimentação de Resíduo de Interesse Ambiental (CADRI) para destinação final ambientalmente adequada deste resíduo, realizado em fevereiro de 2019, apresentou as principais propriedades (**Tabela 1**):

Tabela 1 - Composição da lama de salmoura diafragma – Laudo de análise CETESB

Parâmetro	Resultado (mg/kg)
Arsênio	56,4
Bário	53,8
Cádmio	28,5
Chumbo	33,1
Cobalto	5,15
Cobre	50,4
Cromo	149
Mercúrio	8,19
Molibdênio	3,65
Níquel	19,6
Prata	6,02
Vanádio	26,4
Zinco	103
Sulfeto	1,5
Umidade (% p/p)	31,9
pH	10,57

A empresa em estudo possui um histórico de testes para encontrar uma alternativa de destinação para este resíduo que não seja aterros industriais. A principal tentativa foi um estudo realizado em parceria com a Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ, 1991) da USP. Este estudo analisou a aplicação da lama de salmoura diafragma como corretivo de solo na agricultura. Para os testes, a lama foi lavada e seca, onde o teor de cloreto ficou abaixo de 2% e caracterizada quimicamente. A **Tabela 2** apresenta a composição química da lama de salmoura obtida neste estudo:

Tabela 2 - Composição da lama de salmoura diafragma

Parâmetro	Resultado (%)
Ca	11,8
CaO	17,02
Mg	7,13
MgO	5,96
PN – Poder de Neutralização	41
Sílica mais insolúveis	16,7
Umidade	40,52
Sódio	1,37

Além deste estudo, a própria empresa já realizou testes de lavagem da lama na própria planta industrial, a fim de promover o processo de destinação para empresas interessadas. Um teste realizado em 2010, em laboratório próprio, realizou a lavagem da lama em 3 dias diferentes. Os resultados obtidos da lavagem da lama também obtiveram resultados abaixo de 2% de NaCl (**Tabela 3**).

Tabela 3 - Resultados da lavagem da lama de salmoura para NaCl (%)

Data da Amostra	Cloreto de Sódio (% NaCl)
01/02/2010	0,77
03/02/2010	0,55
04/02/2010	0,74

2.2.3. Processo De Geração Da Lama De Salmoura Diafragma

O sal utilizado na empresa na UNIPAR Carbocloro é do tipo marinho proveniente do Chile. Este insumo é transportado por navio até o porto de Santos, descarregado em caminhões e transportado para os pátios de estocagem existentes da fábrica. O sal descarregado nos pátios é transportado para as moegas e, então, enviado para os saturadores, a fim de atingir a máxima quantidade de soluto dissolvido em água. A salmoura produzida nos saturadores é enviada ao tanque de estocagem e deste bombeada ao reator de salmoura, onde é iniciado o tratamento da mesma.

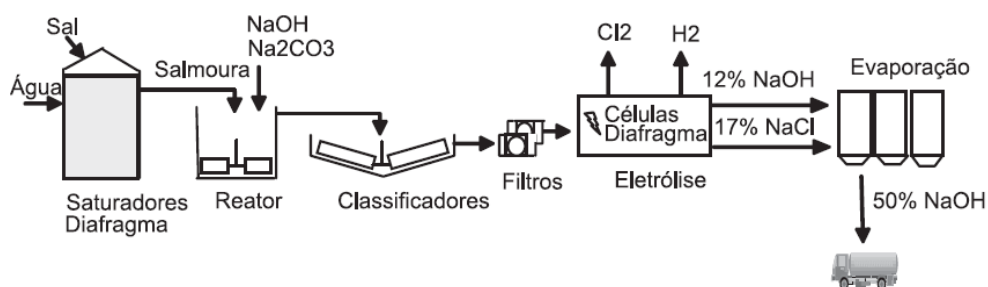
No reator de tratamento, são adicionados carbonato de sódio e soda cáustica que têm como finalidade agregar partículas pequenas de carbonatos e hidróxidos em suspensão, tornando-

as flocos maiores e mais pesadas, o que aumenta a velocidade de decantação e removem impurezas. De acordo com uma pesquisa realizada pelo INMETRO em 2004, as principais impurezas no sal são: teor de resíduos insolúveis, de cálcio, de magnésio e de sulfato. A salmoura tratada é então conduzida para a etapa de filtração e estocagem onde flui para o tanque de salmoura não filtrada e, deste tanque, é bombeada para os filtros de areia e de polimento. Neste filtro, os teores de cálcio e magnésio na salmoura são reduzidos para valores em torno de 1,5 mg/l e 0,1 mg/l, respectivamente (UNIPAR CARBOCLORO, 2019).

Após algum tempo de operação, torna-se necessário realizar-se a contra-lavagem dos filtros de areia. O produto da contra-lavagem é enviado para os decantadores e, após a separação das fases (decantação), a salmoura é enviada para as células eletrolíticas diafragma e a lama residual, chamada de lama de salmoura diafragma, é enviada para o sistema de filtração de lama.

As drenagens de lama de salmoura diafragma provenientes dos decantadores, filtros de areia e de polimento são recebidas no tanque de lama e bombeado para o decantador. Deste decantador, após a separação das fases, a salmoura clarificada do topo retorna para o reator de tratamento onde é reutilizada. A lama decantada é enviada a um filtro prensa onde a mesma é desidratada e enviada a aterro industrial através de certificado de movimentação de resíduos de interesse ambiental (CADRI). O processo como um todo pode ser observado na **Figura 4**.

Figura 4: Processo de fabricação de cloro e soda cáustica utilizando a tecnologia de células diafragma



Fonte: FERNANDES, 2009

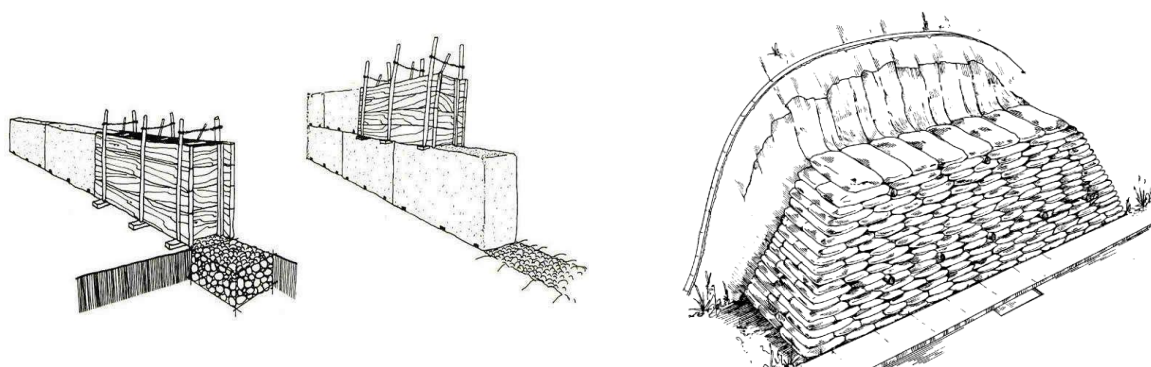
2.3.TIJOLOS SOLO-CIMENTO

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 1986) tijolo solo-cimento (TSC), ou tijolo ecológico, é o material resultante da mistura homogênea, compactada e curada de solo, cimento e água em proporções adequadas. Em sua composição há maior quantidade de solo para uma pequena quantidade de cimento, por isso o nome solo-cimento.

Este tipo de material é fabricado em moldes por meio de compactação ou prensagem, seguido de seu desmolde imediato (Cartilha Solo Cimento (2016) e possui característica de durabilidade e resistência mecânica que permitem atender às exigências das normas aplicáveis para este material (ABCP BT-117, 1996).

Tijolos ecológicos podem ser uma solução simples para diversos tipos de estruturas. Segundo a Associação Brasileira de Cimentos Portland (ABCP BT-117, 1996), este material pode ser utilizado no formato de: pisos, em pavimentação de rodovias, calçadas, paredes monolíticas, sendo uma evolução da tecnologia chamada “taipa de pilão” (**Figura 5**); e em paredes de solo-cimento ensacado, utilizado geralmente como contenção de encostas e em pequenas muretas.

Figura 5 Taipa de pilão e parede de solo-cimento ensacado



Fonte: Associação Brasileira de Cimentos Portland - ABCP BT-117, 1996

Na fabricação de tijolos tradicionais após a extração de argila, mistura e moldagem das peças, estas são levadas para fornos onde são empilhadas e queimadas, em média por 3 dias, para que ganhem forma homogênea. Uma das principais vantagens na utilização de tijolos ecológicos é que, diferentemente do tijolo tradicional, esta não técnica utiliza o processo de queima e, conseqüentemente, não há o consumo de combustível e reduz a derrubada de árvores para queima, tornando-se uma alternativa de baixa agressão ao meio ambiente (SILVA, 2011).

Outro ponto positivo é o custo benefício que envolve todas as etapas do processo de fabricação. De acordo com a Cartilha De Tijolos Ecológicos (CARTILHA, 2016), a adoção deste tipo de material pode atingir até 40% de redução dos custos quando comparado aos sistemas construtivos tradicionais. Por utilizar terra em sua composição, dependendo das características da região, os tijolos ecológicos podem ser fabricados no local ou região de aplicação, retirando a matéria prima do próprio canteiro de obra, e assim, reduzir o custo de transporte. Após a extração e dosagem dos materiais, o tijolo é fabricado em prensas manuais ou hidráulicas. Estes equipamentos são de manuseio relativamente simples e ocupam pouco espaço, reduzindo assim, a necessidade de grande quantidade de mão de obra e áreas extensas para fabricação.

A qualidade deste material alternativo também se destaca. Segundo a Associação Brasileira de Cimentos Portland (ABCP BT-111, 2000) as propriedades dos tijolos de solo cimento apresentam resistência à compressão e à umidade similares à do tijolo cerâmico e propiciam conforto acústico e térmico. O formato de encaixe, que geralmente são moldados os tijolos, facilita o posicionamento dos tijolos diminuindo a necessidade de camadas espessas de argamassas e revestimentos.

2.4. Solos

Não são todas os solos que podem ser utilizadas para a fabricação de tijolos ecológicos. Devido à sua variada composição e tamanhos dos grãos, deve-se passar previamente por um processo de análise e avaliação. A proporção indicada pela Associação Brasileira de Cimentos Portland (ABCP BT-117, 1996) variam na faixa de 6 a 12 partes de cimento para 100 partes de solo seco, em massa. Desta maneira, é facilmente notada a importância que a escolha de um solo adequado representa para a produção de um solo-cimento com qualidade.

Os solos mais indicados são os chamados solos arenosos, pois estes requerem menores quantidades de cimento para serem estabilizados e são facilmente destorroados. Graças à sua baixa coesão interna, permite uma mistura homogênea com o cimento. No entanto, solos com mais de 75% de areia exigem maiores taxas de estabilizantes para alcançar sua melhoria (CARTILHA SOLO CIMENTO, 2016).

Os solos contraindicados para o uso na mistura são os com altos teores de areia e baixos de argila, e também, aqueles com altos teores de argila (CARTILHA SOLO CIMENTO, 2016).

As frações grossas dos solos, ou seja, a areia, são formadas principalmente por grãos de quartzo de forma arredondada, ou angulares, e são caracterizados como não coesivos (GRANDE, 2003). Portanto, solos com muita areia resulta em falta de coesão entre as partículas, tornando difícil a compactação e a moldagem da mistura.

Os solos finos, podem se dividir em dois grupos: siltes, com grãos de tamanho entre 0,002 mm e 0,074 mm, que apresentam pouca ou nenhuma plasticidade; e argilas, com grãos menores que 0,002 mm. No geral, as frações finas consistem em partículas friáveis, geralmente de forma achatada, angular, lamelar ou em agulhas (GRANDE, 2003). Dessa forma, solos com muita argila em sua composição apresentam riscos de fissuras nos tijolos.

A presença de matéria orgânica (MO) no solo também é um fator determinante. BLÜCHER (1951) afirma que o teor de MO é prejudicial em grandes quantidades, sendo o limite máximo seguro de 2% do total de solo. A MO pode ocasionar inibição das reações de hidratação do cimento, fato que provocará, conseqüentemente, a redução da resistência mecânica, da durabilidade e da qualidade do produto final. Devido a isso, é indicado que, na coleta, as camadas superficiais sejam descartadas, geralmente onde são encontrados tais solos (ABCP BT-117, 1996)

Segundo PRESA (2011), os solos mais indicados são os com maior fração de areia em sua composição. Esse tipo de solo necessita de menores quantidade de cimentos comparado com os argilos e siltosos, entretanto, o autor defende que a presença de argila também é necessária na composição do solo, pois confere à mistura coesão, permitindo o manuseio dos tijolos após a prensagem.

CINVA (1963) defende que a proporção ideal para compor o solo de tijolos ecológicos deva ser em torno de 70 a 75% areia e 30 a 25% argila e silte. Segundo a cartilha “Produção de Blocos de Solo Cimento” da Universidade Metodista De Piracicaba, o solo ideal para a fabricação de tijolo solo-cimento seria com cerca de 50% areia, 25% silte e 25% argila. Abaixo é apresentado na **Tabela 4** a compilação das proporções para o solo de sugeridas para composição de solo de tijolos ecológicos de acordo com cada autor:

Tabela 4 - Proporções sugeridas para composição de solo de tijolos ecológicos de acordo com cada autor

Autor/Fonte	Proporção sugerida
Cartilha de Produção de Solo Cimento - Piracicaba – 2016	50% areia
	25% silte
	25% argila
ABCP - Associação Brasileira de Cimentos Portland - Boletim técnico 117 – 1996	50% a 90% areia
	10% a 50% areia e argila
CINVA, 1963	70 a 75% areia
	30 a 25% argila

Fonte: Autoria própria

A proporção ideal da composição do solo destinado para blocos de solo cimento não existe. As proporções indicadas variam de autor para autor, pois a ciência dos solos não é exata. Porém, apesar dessas indicações variarem, estabelece-se um certo consenso de que o solo mais adequado é aquele com maiores quantidades de areia (acima de 50%) e menores quantidades de argila e silte (abaixo de 50%).

É explícito que é imprescindível a correta quantificação das porcentagens desses materiais e a correta incorporação de material argiloso na mistura. Logo, o resíduo utilizado neste estudo, de características argilosas, em conjunto com o solo proveniente de uma região litorânea, configurando altos teores de areia, apresentam alto potencial para produzir um tijolo de solo cimento de qualidade.

2.5. Estabilizantes

O termo “estabilização do solo” corresponde, a qualquer processo, natural ou artificial, pelo qual um solo, sob o efeito de cargas aplicadas, se torna mais resistente à deformação e ao deslocamento, do que o solo primitivo (PRESA, 2011). Dentre esses processos, o mais comumente utilizado é a adição de componentes que irão reagir quimicamente, como o cimento.

O cimento, quando em contato com a água, reage com os componentes do solo (areia, grava) formando uma malha que os une entre eles. Algumas partículas de cal se libertam e reagem com a argila neutralizando assim sua atividade expansiva (CARTILHA SOLO CIMENTO, 2016).

2.6. Cimento

O cimento é composto geralmente por materiais de ocorrência natural como fragmentos e depósitos residuais rochosos que, ao ser misturado com água, forma uma pasta facilmente moldável e, gradualmente, resulta em uma massa compacta e de grande dureza.

Existem diversos tipos de cimento, e dentre eles, o Portland é um cimento que possui em sua composição o clínquer, material obtido através da calcinação de materiais calcáreos e argilosos, que conferem alta resistência mecânica (PRESA, 2016).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) não definiu um tipo específico de cimento para a construção de tijolos ecológicos, porém, recomenda o uso de qualquer cimento do tipo Portland, que sejam novos e que não apresentem sinais de hidratação (ABCP BT-117, 1996).

2.7. Água

De acordo com o Boletim Técnico de Tijolos de Solo-Cimento da Associação de Cimentos Portland (ABCP BT-117, 1996) a água não deve conter impurezas nocivas à hidratação do cimento, como por exemplo matéria orgânica. Sendo assim, recomenda-se, de forma geral para a produção de tijolos ecológicos, as águas potáveis.

2.8. Umidade Ideal

A água é necessária para ativar a ação coesiva das argilas e para ativar a reação do cimento com a areia (CARTILHA SOLO CIMENTO, 2016). O solo-cimento, quando compactado com umidades diferentes das ideais, estará sujeito, após poucos dias, à ocorrência de fissuras indesejáveis e diminuição da resistência mecânica.

Alguns manuais como a Cartilha de Solo Cimento (2016) ou o Boletim Técnico 117 da Associação Brasileira de Cimentos Portland (ABCP BT-117, 1996) indicam alguns testes empíricos e simplificados que podem ser feitos para obter a umidade ótima da mistura solo-cimento-água. Um desses testes consiste em formar uma bolinha da mistura com as mãos e apertar. Ao abrir a mão, a massa deverá obter a marca deixada pelos dedos, indicando uma umidade ótima. Caso a marca não ocorra, é um sinal de que a mistura está muito seca; nesse caso, deve-se adicionar água até que as marcas dos dedos fiquem aparentes.

Outro teste consiste em formar a bolinha com as mãos e deixa-la cair, de uma altura de aproximadamente de um metro, sobre uma superfície rígida. No impacto, a bolinha deverá se desmanchar de forma uniforme, indicando também umidade ótima. A mistura que, ao cair, resultar em uma massa única e compacta, indicará excesso de água. Caso a bolinha se desmanche completamente em pedaços miúdos, será indício de pouca água (ABCP BT-117, 1996)

3. RESÍDUOS INCORPORADOS EM TIJOLOS DE SOLO CIMENTO

De acordo com o levantamento bibliográfico, diversos trabalhos utilizaram material lamoso proveniente de estações de tratamento de água (ETA) e de esgoto (ETE) na incorporação de tijolos de solo cimento e obtiveram resultados positivos. BOHNEN et. al. (2017) comparou a incorporação de lodo dos dois processos e mostrou que ambos os materiais apresentaram potencial para aplicabilidade deste tipo de resíduo em cerâmica vermelha, concreto e pavimentação.

RODRIGUES e HOLANDA (2013) constataram lodo de estação de tratamento de água (ETA) pode ser incorporado em tijolo solo-cimento numa quantidade de até 1,25% em peso como substituto parcial do solo natural. Os traços com 2,5%, 3,75% e 5% resultaram em maior absorção de água e redução da massa específica. Isso se dá devido o lodo ser rico em partículas finas, que podem formar grânulos na composição, e em matéria orgânica, a qual tende a influenciar negativamente as reações de hidratação.

Enquanto que JÚNIOR (2010) constatou que a proporção de 5% de lodo de uma ETE, resultou em tijolos ecológicos com características técnicas viáveis para a comercialização. As proporções de 5 e 10% atenderam as exigências quanto a absorção de água obtendo resultados abaixo de 20%. Enquanto que apenas o traço de 5% de lodo atingiu exigência de resistência à compressão média acima de 2 Mpa.

Há também a possibilidade de combinar dois ou mais tipos de resíduos para esta aplicação. SOUZA (2006) experimentou a adição conjunta de lodo gerado em estações de tratamento de água e resíduos de construções e demolições em argamassas e concretos reciclados. Os resultados foram positivos com a adição de até 4% de lodo para resistência a compressão e embora a absorção de água das argamassas produzidas com a adição conjunta de lodo tenha sido maior que as convencionais, os resultados não impediram o seu uso, apenas restringiram seu uso a lugares livres de umidade e da ação de intempéries.

Resíduos de origens variadas também apresentam potencial de aplicabilidade em tijolos de solo cimento. PINHEIRO (2013) e CAZZONATTO (2004) utilizaram resíduo da indústria de papel e celulose e GRANDE (2003) comparou o comportamento de tijolos de solo-cimento tradicional com tijolos de solo-cimento com a adição de sílica, um subproduto da

indústria do ferrosilício, e constatou que a adição deste resíduo pode aumentar a resistência mecânica à compressão.

Outra aplicabilidade para o tijolo solo-cimento são as alvenarias de vedação (BESSA, 2019). Neste estudo, obteve-se resultados mecânicos positivos na aplicação de resíduos de construção e demolição na produção de tijolos de solo cimento para alvenarias deste tipo. SOUZA, SEGANTINI e PEREIRA (2008) também avaliaram o aproveitamento de resíduos de concreto na confecção de tijolos prensados de solo-cimento e como resultado verificou-se que a adição dos resíduos proporcionou melhoria nas propriedades mecânicas do solo-cimento, favorecendo a redução do consumo de cimento e a obtenção de tijolos de melhor qualidade

4. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentados os principais materiais e procedimentos metodológicos utilizados neste trabalho. Vale salientar que esse estudo foi desenvolvido em parceria com a Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos.

O trabalho experimental foi dividido em três etapas principais. Na primeira etapa foi realizada a coleta e preparo da lama de salmoura e do solo. Na segunda etapa foi realizada a caracterização desses materiais. Na terceira etapa realizou-se a definição dos traços, moldagem e caracterização dos corpos de prova.

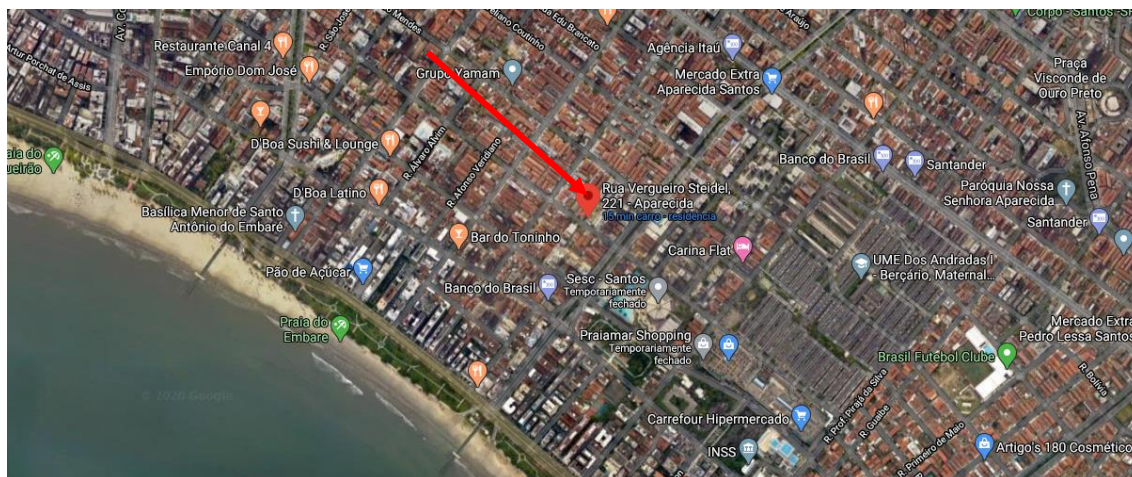
4.1. Coleta e preparo dos materiais

Os materiais utilizados na confecção dos tijolos ecológicos foram: resíduo de lama de salmoura diafragma, solo, cimento CPV ARI, e água. Foi utilizado um traço padrão de 10:1 (solo:cimento) de acordo com recomendação da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 1988).

4.1.1. Solo

O solo foi coletado no bairro Aparecida, na cidade de Santos – SP em uma área de escavação, durante uma obra de um edifício residencial (**Figura 6**).

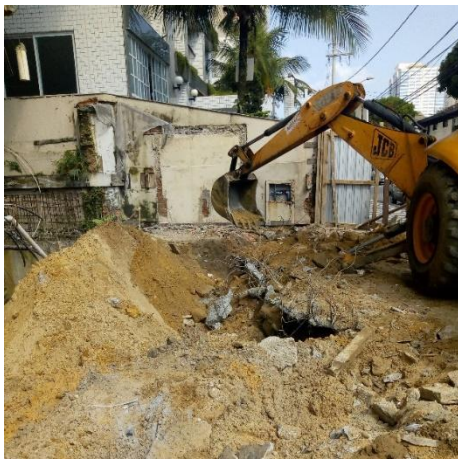
Figura 6: Origem do solo (Santos – SP).



Fonte: Google maps

O material foi extraído a partir de 50 cm de profundidade, a fim de evitar a presença de materiais orgânicos. Houve a preferência em coletar o solo na região próxima da fonte do resíduo utilizado como agregado, a fim de facilitar a logística de uma possível produção futura dos tijolos na própria região (**Figura 7 a e b**). Ao chegar no laboratório, o solo foi seco em estufa a 110 °C durante 24 h e armazenada em sacos plásticos (**Figura 7 c**).

Figura 7- Escavação em obra residencial (a), material coletado para ensaios em laboratório (b), areia seca (c)



(a)



(b)



(c)

4.1.2. Lama de salmoura diafragma

As amostras de lama de salmoura foram coletadas na indústria química brasileira de soda cáustica UNIPAR-Carbocloro, localizada na cidade de Cubatão – SP.

Após o processo de tratamento da salmoura, a lama é prensada em tortas para remover o excesso de líquidos e descartada em caçambas de 26 m³. As amostras foram coletadas de uma mesma leva de descarte, ou seja, de uma mesma caçamba e armazenadas em sacos plásticos.

A lama é proveniente do processo de células diafragma, tecnologia utilizada para produzir cloro, soda cáustica, hidrogênio, ácido clorídrico e hipoclorito de sódio (FERNANDES, 2003). O processo ocorre com a mistura de água com sal e energia elétrica, onde a salmoura utilizada deve ser tratada previamente a fim de se obter uma solução mais pura, exigida para o processo. A partir do processo de tratamento prévio da salmoura, é gerado o resíduo lamoso chamado “lama de salmoura diafragma”.

No laboratório, a lama (**Figura 8a**) foi seca em estufa a 110 °C durante 24 h e, posteriormente, destorroada em moinho de mandíbulas (**Figura 8b**) com a devida cautela, a fim de evitar a quebra de grãos. Por fim, foi peneirada em malha com abertura de 4,8 mm (**Figura 8c**).

Figura 8: Beneficiamento da lama a) Lama de salmoura in natura, b) moinho de mandíbulas e c) lama seca e destorroada





(b)



(c)

4.2. Caracterização dos materiais

4.2.1. Análise granulométrica

A análise granulométrica é destinada para determinar a distribuição em tamanhos das partículas dos solos. Os ensaios de composição granulométrica foram realizados segundo a NBR 7181 (ABNT, 1984a), através dos processos de sedimentação e peneiramento. Ambos os materiais (solo e lama) foram destorroados, passados na peneira de malha 2 mm e submetidos à solução defloculante (**Figura 9**) a fim de promover a desagregação dos torrões maiores.

Figura 9: Solução defloculante



O material que passou na peneira de 2 mm foi separado, pesado e misturado ao defloculante, onde permaneceu em repouso por 12 horas (**Figura 10 a**). Após este período, a solução foi colocada em um copo de dispersão e submetido à ação do aparelho dispersor (**Figura 10 c**) durante 15 minutos. Transferiu-se o material para uma proveta, agitando com o auxílio de bagueta de vidro frequentemente para manter as partículas em suspensão. Ao atingir temperatura constante, mergulhou-se o densímetro efetuando as leituras correspondentes ao tempo de sedimentação (t) de 0,5 min, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h e 24 h.

Figura 10 – Análise Granulométrica a) Materiais em repouso com o defloculante. b, c e d) ensaio de granulometria por sedimentação no solo



(a)



(b)



(c)



(d)

Após o processo de sedimentação, os materiais passaram pelo peneiramento fino. A parcela retida na peneira 0,075 mm foi seca em estufa a 110 °C e, com o auxílio do agitador mecânico, foi passada nas peneiras 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm e 0,075mm. Não foi necessário realizar o peneiramento grosso, pois a parcela remanescente da etapa anterior foi considerada insignificante. A massa determinada foi a massa retida acumulada em cada peneira.

4.2.2. Massa específica

Massa específica aparente é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, incluindo os poros permeáveis (ABNT NM 52). As massas específicas dos materiais em estudo foram determinadas segundo a NBR 6458 (ABNT, 2017) para grãos retidos na peneira de 4,8 mm. As amostras de cada material foram imersas em água destilada à temperatura ambiente, por 24 horas, e após este período, superficialmente secas e determinadas a massas saturadas (M_{sat}). Posteriormente, foram novamente imersas em água destilada, a fim de determinar sua massa imersa (M_i). Feito isso, levou-se cada recipiente para secar em estufa à 110 °C por 24h e determinou-se então as respectivas massas secas (M_s).

Para calcular a massa específica da água, utilizou-se a seguinte equação:

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_s - M_i} \times \rho_w$$

Onde:

ρ_s : é a massa específica, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³);

M_s : é a massa da amostra seca

M_i : é a massa da amostra totalmente imersa em água destilada;

ρ_w : é a massa específica da água a temperatura T do ensaio.

Para determinar a absorção de água, utilizou-se a seguinte equação:

$$Aa = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100$$

Onde:

Aa : é a absorção de água, em porcentagem da massa do material seco.

M_{sat} : é a massa da amostra saturada, superficialmente seca.

4.2.3. Limites de consistência

Segundo CORRÊA (1982), a consistência do solo é decorrente das manifestações de forças físicas de adesão e coesão que atuam no solo conforme a variação da quantidade de água. Solos com baixo teor de umidade apresentam-se duros e coesos. No caso do solo com alto teor de umidade, apresenta características plástica, ou seja, possui capacidade de retomar sua forma original e pegajosidade, capacidade de aderir a outros objetos. Os limites de consistência indicam a mudança de estados físicos de acordo com o percentual de umidade.

Mauritz Atterberg (1846 - 1916) foi o responsável por introduzir os conceitos de limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade. O limite de liquidez (LL) é caracterizado pela quantidade de água que, adicionada ao solo, é capaz de causar perda de coesão de suas partículas, ou seja, é o teor de umidade que separa o estado líquido do estado plástico do solo; O limite de plasticidade (LP) é caracterizado pelo momento em que, se retirada gradativamente a umidade do solo, este passa do estado plástico (moldável) para o estado semi sólido (não moldável). O índice de plasticidade é obtido pela diferença entre os limites de liquidez e de plasticidade. Conforme a classificação sugerida por Jenkins CAPUTO (1987) classifica o solo, segundo seu índice de plasticidade, como:

- $1 < IP < 7$: solos fracamente plásticos
- $7 < IP < 15$: solos medianamente plásticos
- $IP > 15$: solos altamente plásticos

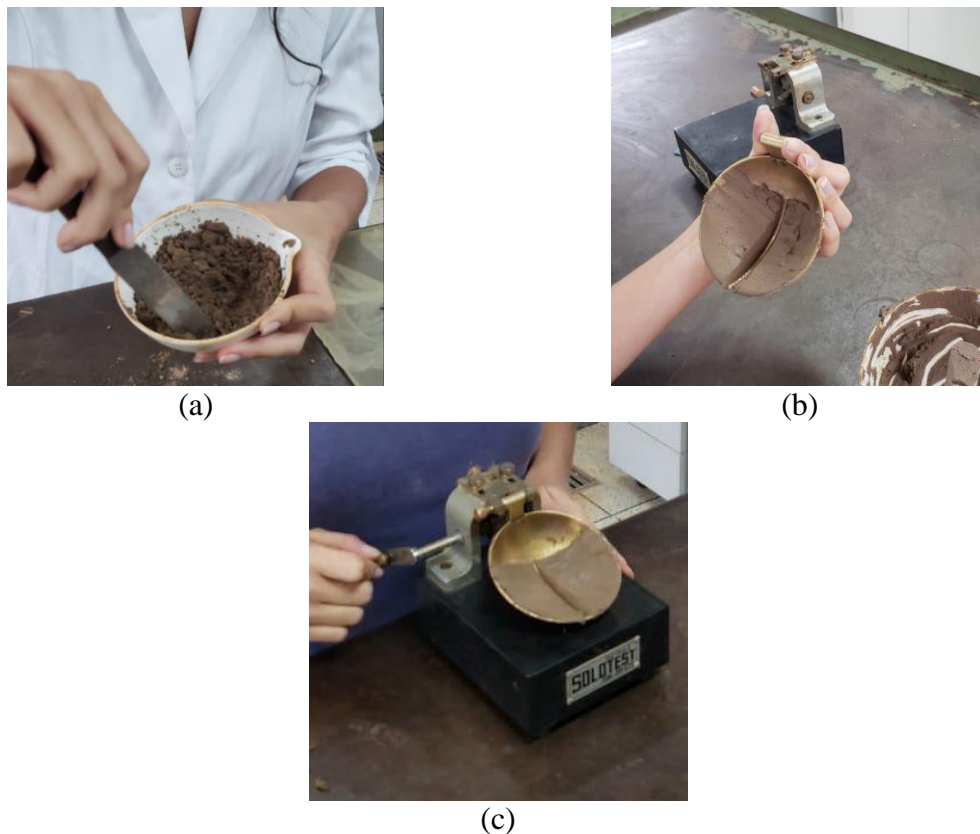
4.2.4. Limite de liquidez

Para o preparo dos materiais seguiu-se a NBR 6457 (ABNT, 2016) a qual recomenda preparar previamente com o destorroamento das partículas agregadas dos materiais que passaram pela peneira de malha de 0,42 mm. Para determinação do limite de liquidez do solo, utilizou-se a NBR 6459 (ABNT, 2016). As amostras de ambos os materiais foram homogeneizadas em um recipiente de porcelana com o auxílio de água destilada e, transferidas para a concha do aparelho Casagrande. Com o auxílio de uma espátula, os materiais foram distribuídos de forma uniforme, a fim de manter uma superfície lisa e uniforme (**Figura 11**).

Dessa forma, foi traçada uma ranhura na amostra ao longo do eixo y de forma que as duas partes tivessem massas aproximadamente iguais. A concha foi posicionada cuidadosamente

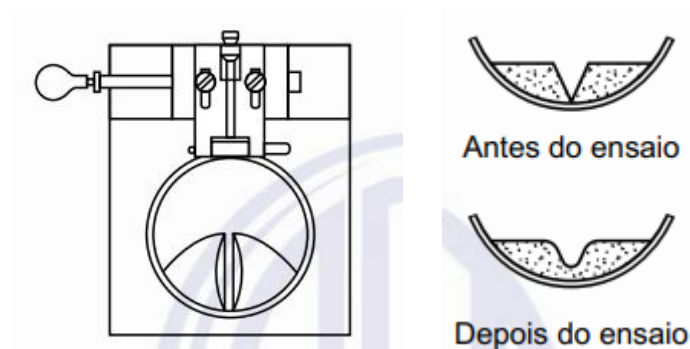
à base do aparelho e a manivela foi girada à razão de duas voltas por segundo contando-se o número de golpes necessários até que as bordas inferiores do material se encontrassem.

Figura 11 - Ensaio de limite de liquidez. a) homogeneização do material com água destilada, b) ranhura na amostra ao longo do eixo y e c) giro da manivela do aparelho Casagrande.



Ao final dos golpes, uma amostra foi coletada no ponto onde a ranhura se uniu (**Figura 12**) e foi colocada em cápsulas identificadas. As cápsulas foram pesadas e levadas a estufa, a fim de, determinar o teor de umidade. Esta operação foi repetida 5 vezes de modo a cobrir o intervalo 35 a 15 golpes.

Figura 12 - Aspecto da ranhura no aparelho Casagrande após golpes. a) visão superior e b) secções do aparelho Casagrande



Fonte: NBR 6459, 2016

4.2.5. Limite de plasticidade

O limite de plasticidade represente a capacidade que o solo possui de deformar-se sem fissurar-se (CARTILHA SOLO CIMENTO, 2016). O ensaio foi baseado na NBR 7180 (ABNT, 2016) para o solo e para a lama. Após os materiais que passaram na peneira de malha de 0,42mm serem destorroados, estes foram colocados em um recipiente de porcelana, acrescentando-se água destilada, a fim de se obter uma pasta homogênea de consistência plástica. Separou-se 10 g da amostra e, utilizando a palma da mão, formou-se uma esfera aproximadamente uniforme. Feito isso, friccionou-se sobre uma placa esmerilhada com pressão suficiente até que se formasse um formato cilíndrico com 3 mm de diâmetro, aproximadamente (**Figura 13**).

O procedimento foi repetido, retornando o material à capsula e adicionando água destilada até que o cilindro apresentasse pequenas ranhuras ao atingir 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, verificado com o gabarito comparador. Sendo assim, as amostras foram imediatamente transferidas para cápsulas identificadas e levadas a estufa para determinar a umidade. O procedimento foi repetido até obter-se 5 amostras.

Figura 13 - Ensaio de limite de plasticidade. a) Fricção e moldagem do solo em cilindros e b) cápsulas identificadas para serem levadas à estufa



(a)



(b)

4.2.6. Teor de umidade

Para este ensaio, foram tomadas 3 cápsulas de alumínio com 20 g de massa do solo e da lama. O conjunto sólido úmido e cápsula foram pesados (M_1) e levados para a estufa a $\pm 100^\circ$ por 12 horas. Após este período, as cápsulas foram pesadas e determinou-se o peso do conjunto massa do solo seco + cápsula (M_2). O teor de umidade do solo foi determinado a partir da seguinte equação.

$$w = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \times 100$$

Onde:

W: teor de umidade (%)

M1: massa do sólido úmido mais a massa do recipiente (g)

M2: massa do solo seco mais massa do recipiente (g)

M3: massa do recipiente (cápsula metálica com a tampa) (g)

4.2.7. Determinação dos sais na lama de salmoura

Para determinar o teor de sais da lama de salmoura, diluiu-se lama seca e destorroada em água destilada na proporção de 1/5, 50g de lama para 250g de solvente e, 1/6, 50g de lama para 300g de solvente. A solução foi filtrada e seca em estufa a $\pm 100^\circ\text{C}$ durante 24 horas (**Figura 14**). Após esse período, foi realizada a pesagem e determinada a massa dos sais que permaneceram no recipiente.

Figura 14 - Determinação dos sais na lama. a) lama sendo filtrada em provetas graduadas e b) sal remanescente no recipiente após seco em estufa



(a)

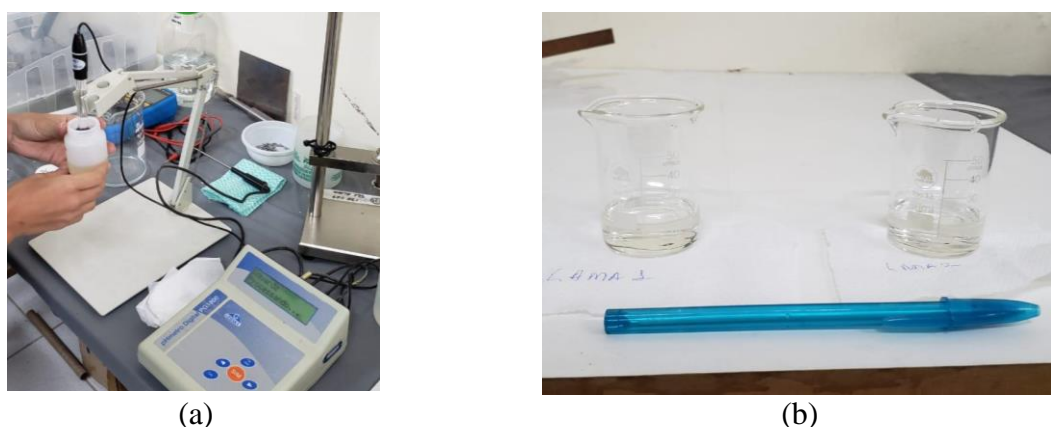


(b)

4.2.8. Corrosividade

O ensaio de corrosividade do resíduo embasou-se na NBR 10004 - Resíduos Sólidos – Classificação - item 4.2.1.2. (ABNT, 2004), onde determina o nível de corrosividade. O resíduo é considerado corrosivo se a amostra apresentar pH inferior ou igual a 2 e superior ou igual a 12,5. Sendo assim, separou-se uma amostra de lama destorroadada e diluiu-se essa amostra em água destilada na proporção 1:1. Essa solução foi filtrada, como descrito no item anterior e, em seguida, mediu-se o pH através do phmetro (**Figura 15**).

Figura 15 - Determinação do pH da lama. a) medição do pH no phmetro e b) amostras 1 e 2



4.3. Moldagem dos corpos de prova

Conforme sugere a Associação Brasileira de Cimentos Portland (ABCP, BT 117, 1996), o solo indicado para compor o tijolo de solo cimento deve conter, aproximadamente, de 50 a 90% de areia e de 10 a 50% de areia e argila. Comparando os resultados obtidos neste estudo com a revisão da literatura, foram definidos dois traços para a moldagem, um na proporção (em massa) 30/70, sendo 30% resíduo e 70% solo e o outro na proporção (em massa) 50/50, sendo 50% resíduo e 50% solo (**Tabela 5**). Para verificar o teor ótimo de umidade na mistura e obter um bom resultado de compressão, foram realizados os testes de moldar e amassar uma amostra do solo e assim, verificar a marca deixada pelos dedos e o comportamento da massa (**Figura 16 a**); e o teste de modelar uma amostra do solo com as mãos e deixar cair de uma altura de, aproximadamente, um metro sobre uma superfície rígida (**Figura 16 b**), verificando como a amostra se esfarela. Estes métodos foram descritos no item 2.2.5. Umidade ideal do solo. Ambos os resultados indicaram que a mistura possuía uma umidade ótima (ABCP BT-111, 2000)

Figura 16 - Teste de umidade ótima a) marca dos dedos e b) solo esfarelado mostrando o comportamento do solo e a umidade ótima.

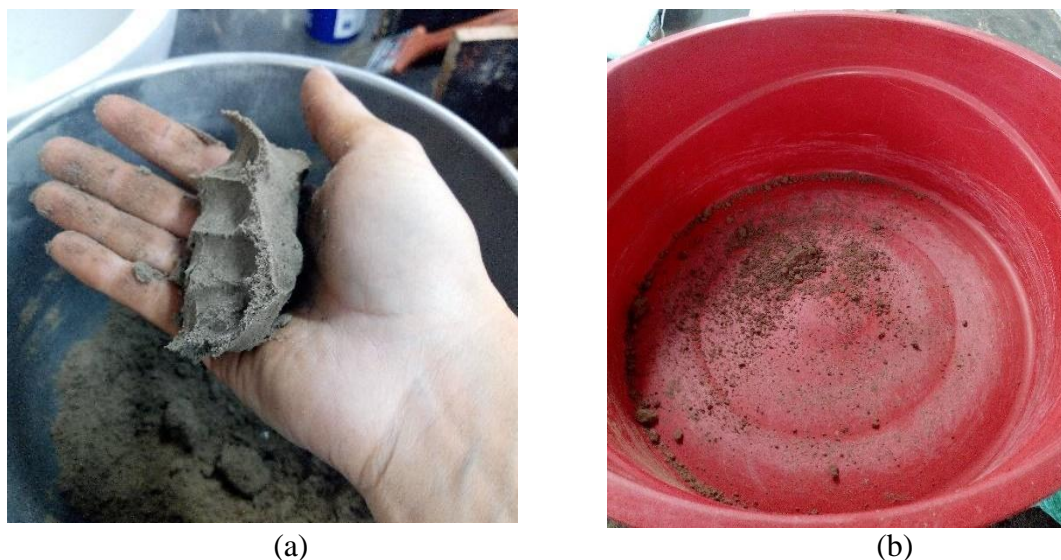


Tabela 5 - Composição dos traços

Materiais/Composições (% em massa)	30/70	50/50
Lama	30	50
Solo	70	50
Cimento CP V ARI*	10	10
Água*	14	20

*% em massa em relação ao solo + lama secos

A preparação dos corpos de prova foi realizada seguindo as recomendações da NBR 12024 (ABNT, 1992). Os materiais utilizados para a moldagem foram lama de salmoura, solo, cimento CP V ARI e água (**Figura 17 a**). Inicialmente o material seco foi misturado em uma batedeira industrial e a mistura obtida foi separada em pequenas porções e colocadas em cápsulas cilíndricas de 5 cm x 10 cm (diâmetro x altura) contendo três camadas (**Figura 17 b**). Cada camada foi compactada com 6 golpes com soquete padrão mini proctor e escarificada para manter a aderência (**Figura 17 c**).

Figura 17 - Moldagem dos corpos de prova. a) mistura dos materiais, b) capsulas cilíndricas e c) soquete padrão mini proctor



(a)



(b)



(c)

Ao término da compactação, os corpos de prova foram cobertos com plástico filme para evitar a perda de umidade (**Figura 18**). Após 24 horas, as amostras foram desmoldadas, embaladas com plástico filme e mantidas em ambiente de laboratório para cura durante 7 dias.

Figura 18 - Corpos de prova moldados e prontos para cura de 7 dias. a) traço 30/70 e b) traço 50/50



(a)



(b)

Após 7 dias de cura os CPs foram identificados e preparados para os ensaios de absorção de água e resistência à compressão (**Figura 19**).

Figura 19 - Corpo de prova pronto para testes de resistência física



4.4. Ensaio de absorção de água e densidade.

Após o período de cura de 7 dias, os corpos de prova foram levados à estufa a $\pm 100^\circ \text{C}$ por 24 horas. Após retirados da estufa, foi obtido a massa seca (m_s) e, em seguida, imersos em tanque com água por 24 h. Após este período, foram retirados e enxugados suavemente para retirar o excesso de água da superfície, e em seguida foram pesados para a obtenção da massa saturada superfície seca (m_{sat}) e massa imersa (m_i). O ensaio foi realizado segundo especificações da NBR 13555 (ABNT, 1996). Após obter os resultados de M_{sat} e M_s , a absorção de cada corpo de prova foi determinada pela seguinte equação:

$$A (\%) = \frac{(M_{\text{sat}} - M_s)}{M_s} \times 100$$

Onde:

A: Absorção de água (%)

M_{sat} : Massa saturada superfície seca (g)

M_s : Massa seca (g)

A massa específica dos corpos de prova foi determinada pela seguinte equação:

$$ME = \frac{M_s}{M_{\text{sat}} - M_i} \times 100$$

Onde:

ME: Massa específica (g/cm^3)

M_{sat} : Massa saturada superfície seca (g)

M_s : Massa seca (g)

M_i : Massa imersa (g)

4.5. Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme NBR 12025 (ABNT, 1990). Inicialmente os corpos de prova foram nivelados, capeados com cimento (**Figura 20 a e b**) e mantidos em cura com plástico filme durante o período de 7 dias conforme sugere a NBR 12024 (ABNT, 1992). Após a cura, foram submetidos à imersão (**Figura 21**) por 4 horas e, ao retirar os corpos de prova do banho, foram medidos os diâmetros e alturas de cada cilindro e colocados na prensa para realização do teste (**Figura 22**).

Figura 20 - Capeamento dos corpos de prova com cimento

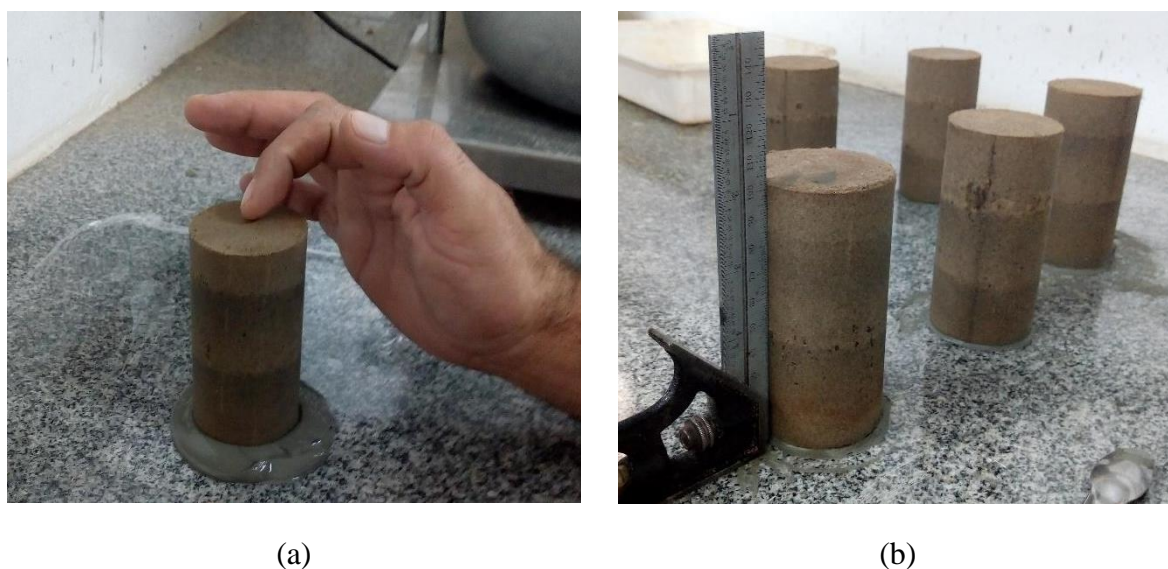


Figura 21 - Imersão para ensaio de resistência à compressão



A tensão de ruptura obtida no ensaio foi obtida dividindo a carga de ruptura pela área da seção transversal do corpo de prova, e o resultado foi expresso em MPa (mega pascal).

Figura 22 - Ensaio de resistência à compressão



5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item serão apresentados e discutidos os resultados dos procedimentos experimentais descritos no capítulo 3.

5.1. Caracterização dos materiais

5.1.1. Limites de Consistência

Na **Tabela 6** estão apresentados os resultados para os ensaios de limites de consistência. O teor de umidade que separa o estado líquido do estado plástico da lama de salmoura é de 61,5% (**Figura 23**). O limite de plasticidade, ou seja, o ponto em que a lama passa do estado plástico para o estado semi-sólido é dado a partir do acréscimo de 50,5% de água, em relação à massa seca total. E o índice de plasticidade, que pode ser matematicamente definido como a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, é de 11,1% (**Figura 24**).

O solo arenoso foi considerado como sendo não plástico (NP), pois as partículas de areia não possuem a capacidade de serem moldadas, não apresentando plasticidade, ao contrário do que ocorre com as argilas (BRADY, 1989). Além disso, a mostra do solo não apresentou limite de liquidez (NP), ou seja, não atingiu a abertura da ranhura ou o seu fechamento com mais de 25 golpes (LAGETEC, 2016).

Tabela 6 - Resultados ensaio de Limites de Consistência

Ensaio	Norma	Requisitos	Resultados obtidos (%)	
			Lama de Salmoura	Solo de Santos
Limite de liquidez		≤ 45 %	61,5	NL
Limite de plasticidade	NBR 10832	≤ 18 %	50,5	NP
Índice de Plasticidade		-	11,1	-

Figura 23 - Limite de Liquidez da Lama

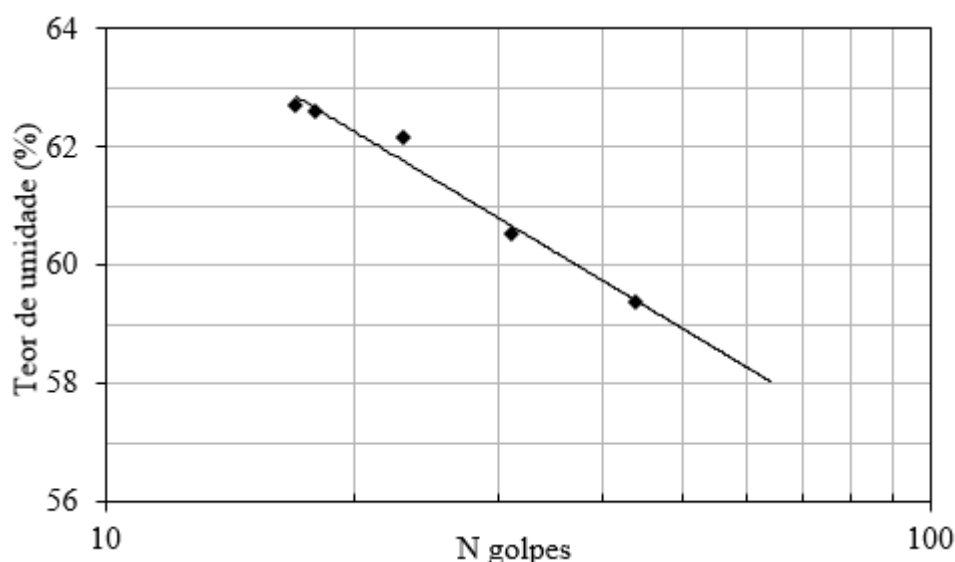
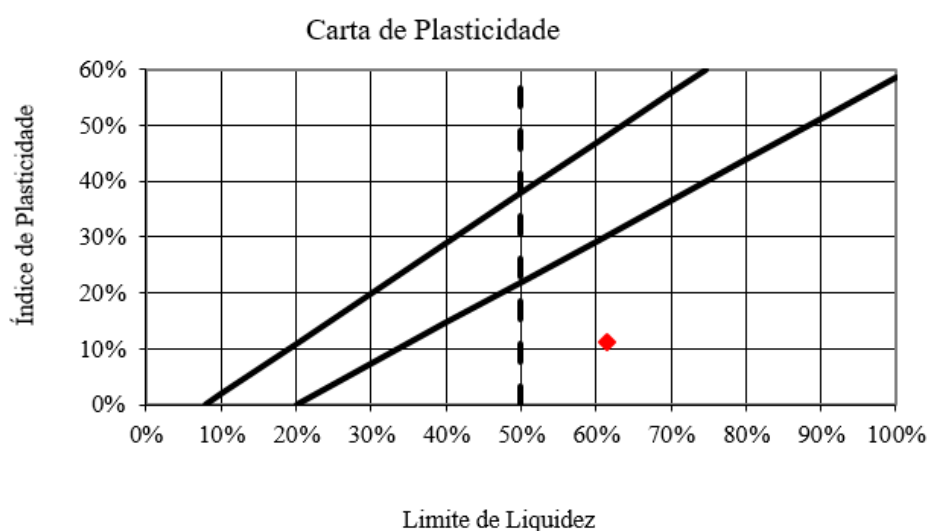


Figura 24 - Índice de plasticidade



De acordo com PRESA (2011), o solo destinado para tijolos deve apresentar certo teor de plasticidade e não é indicado que seu limite de liquidez seja menor que 40-45%. Em casos em que o limite de liquidez seja alto, é recomendado misturá-lo com areia.

Conforme a classificação sugerida por Jenkins (CAPUTO, 1987), a lama de salmoura possui índice de plasticidade entre 7 e 15%, representando ser um material medianamente plásticos. De acordo com LOPES (2002), a plasticidade de um solo é influenciada por sua textura e pela natureza mineralógica das argilas presentes. Quanto maior o índice de plasticidade mais o material estará sujeito às variações dimensionais, resultantes do inchamento do solo quando úmido e de sua retração, quando seco.

Sendo assim, os materiais analisados, a lama e o solo arenoso, mostram-se complementares e com alto potencial de formar uma composição bem-sucedida e sem prejuízos para moldagem dos corpos de prova.

5.1.2. Teor de umidade

O teor de umidade foi determinado para ambos os materiais, onde a lama de salmoura apresentou valor médio de 9,8% e o solo 0,4%. Os resultados estão apresentados na **Tabela 7**.

Tabela 7 - Teor de umidade dos materiais

Ensaio	Norma	Nº de análises	Resultados Obtidos (%)	
			Lama	Solo
Teor de umidade	NBR 7181	3	9,82	0,4

5.1.3. Massa específica

A lama de salmoura apresentou massa específica igual a 2,64 g/m³ e o solo, 2,57 g/cm³ apresentada na **Tabela 8**.

Tabela 8 - Massa específica dos materiais

Ensaio	Norma	Nº de análises	Resultados Obtidos (g/cm ³)	
			Lama	Solo
Massa específica	NBR 6508	4	2,64	2,67

5.1.4. Distribuição Granulométrica

Após a determinação do teor de umidade e massa específica, foi realizado apenas o peneiramento fino, pois, durante os ensaios no laboratório, constatou-se que não houve a necessidade de realizar o peneiramento grosso, devido ao tamanho dos grãos. A partir daí,

foi possível determinar as curvas granulométricas (**Figuras 25 e 26**), e as dimensões dos grãos (**Tabela 9**) do solo e da lama, respectivamente.

Figura 25 - Curva granulométrica do solo

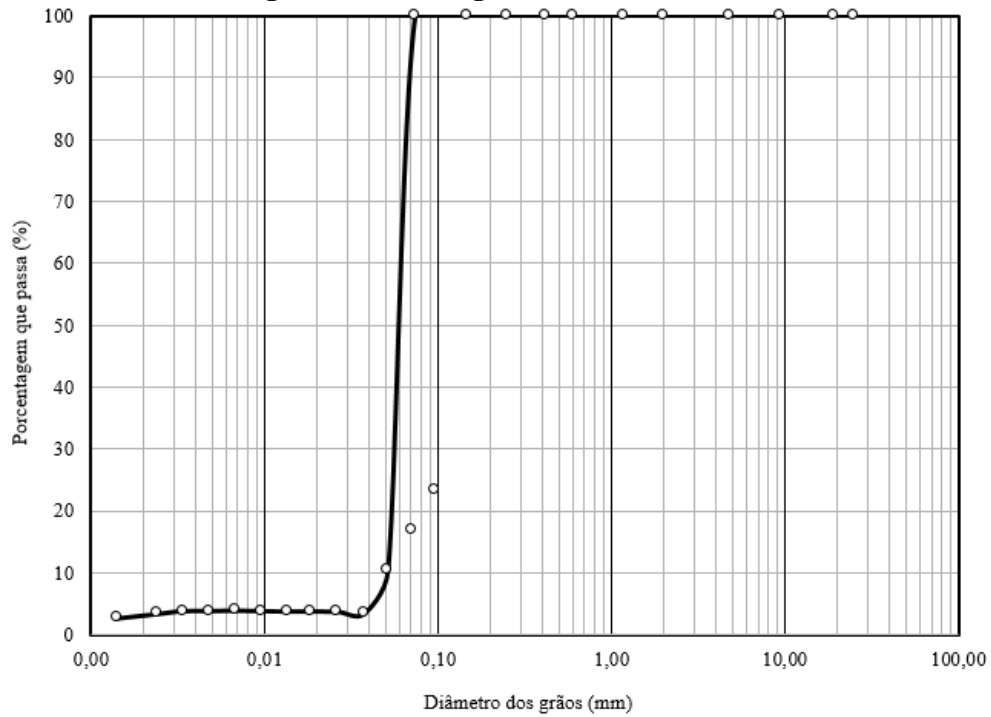


Figura 26 - Curva granulométrica da lama

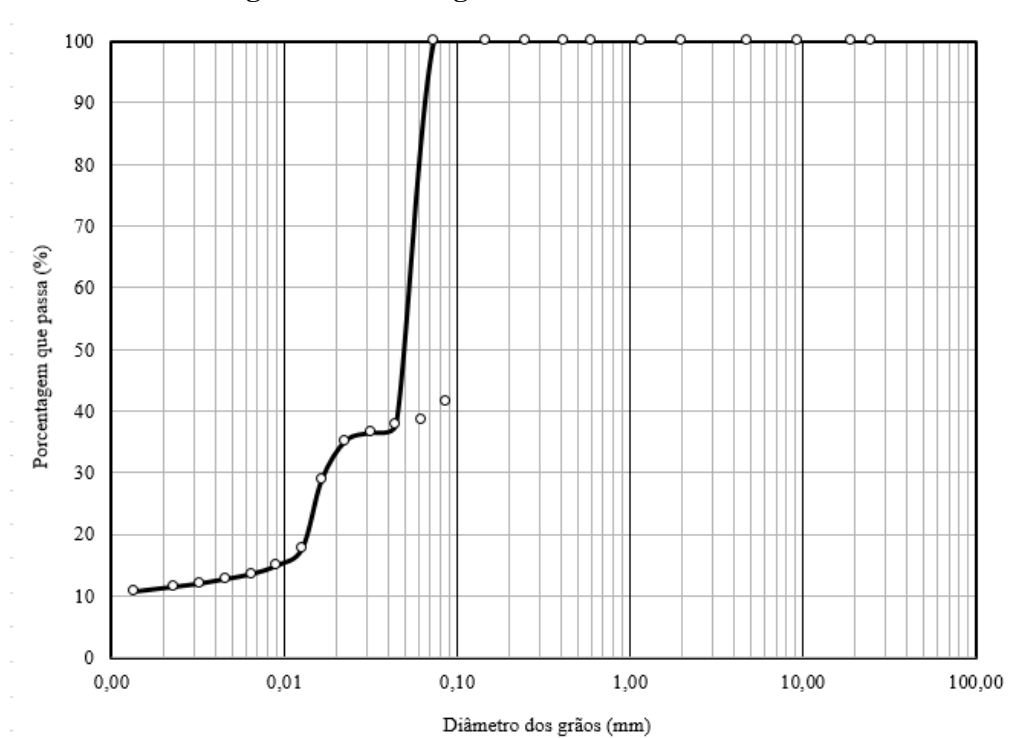


Tabela 9 - Resultados ensaio de granulometria

Ensaio	Norma	Material	Tamanho das partículas (mm)		
			Argila < 0,002	Silte 0,002 - 0,06	Areia Fina 0,06 - 0,20
Granulometria	ABNT 7181	Lama	11%	27%	62%
		Solo	3%	8%	89%

A **Tabela 9** apresenta os resultados da granulometria dos materiais. O solo estudado apresentou em sua composição aproximadamente 89% de areia, sendo esta constituída de areia fina, 8% de silte e 3% de argila. A lama de salmoura obteve como resultados 62% de areia fina, 27% silte e 11% argila. Se analisarmos a composição conjunta dos materiais, com base nos resultados apresentados pelo ensaio de granulometria realizado em laboratório, pode-se inferir que o solo em questão é considerado ideal, neste contexto, para se trabalhar com fabricação de tijolos de solo cimento, já que ele possui quantidade suficiente de areia para estabilizar com o cimento. Enquanto que o resíduo de lama de salmoura apresentou 38% de material fino em sua composição, obtendo a quantidade necessária de argila e silte para dar a “liga” (ou coesão) necessária na mistura, a fim de permitir a manipulação inicial e facilitar a moldagem do bloco pós fabricados.

A NBR 10833 - Fabricação de Tijolo e Bloco de Solo-Cimento com Utilização de Prensa Manual ou Hidráulica (ABNT, 1989) recomenda que o solo destinado para compor tijolos de solo-cimento deve ter 100% de material passante na peneira de malha 4,75 mm e obter de 10% a 50% passante na peneira de abertura de malha 0,075 mm. Analisando as curvas granulométricas do solo e da lama, respectivamente, observa-se que o solo e a lama se enquadram na primeira recomendação, porém não se enquadram na segunda.

Isto ocorre porque provavelmente o defloculante não foi totalmente eficiente ao desagregar as partículas da lama e do solo, pois observou-se pequenos grumos deste material após o processo de defloculação devido à grande quantidade de materiais finos. No entanto, é importante ressaltar que ambos os materiais serão combinados para compor a mistura final de solo. Para isso, foram analisados dois traços para moldagem e testes de resistência física, a fim de analisar qual é a melhor proporção para uma boa composição de tijolo solo-cimento.

5.1.5. Análise dos traços

A partir da mistura da determinação dos traços para compor os corpos de prova, foram obtidas as respectivas porcentagens totais em peso de cada componente, apresentada na **Tabela 10**.

Tabela 10 - Composição dos corpos de prova em %

Traço	% total (em peso)			
	Areia	Lama	Cimento	Água
30/70	56,45	24,19	8,06	11,29
50/50	38,46	38,46	7,69	15,38

Comparando os resultados obtidos neste estudo com a revisão da literatura, observa-se que o traço 30/70 foi o que mais se aproximou das recomendações da literatura obtendo, aproximadamente, 56% de areia e 24% de lama, que representa a parte de argila e silte. Dessa forma, infere-se que a composição solo+lama possui potencial para compor tijolos ecológicos.

5.2. Determinação do teor de sais na lama

Após retirar a lama filtrada da estufa, a massa de sais decantado no recipiente foi pesada, e então, determinou-se que a lama de salmoura contém, aproximadamente, 10,8% de sais em sua composição. As proporções e os resultados estão expressos na **Tabela 11**.

Tabela 11 - Resultados determinação e sais na lama

Proporção lama/água (g)	Nº da amostra	Massa dos sais (g)	Teor de sais (%)
50/250	1	5,7	11,4
	2	5,4	10,8
50/300	1	5,3	10,5
	2	5,4	10,7
Média de teor de sais na lama de salmoura:			10,8 %

INGLES E METCALF (1972) apontam que sais solúveis na mistura de alvenarias podem causar reações expansivas na pasta de cimento ou seja, pode ser prejudicial para materiais com função estrutural, como vigas, lajes, coberturas ou qualquer material que dão suporte à construção. No entanto, é importante lembrar que o objetivo deste estudo é analisar a lama de salmoura incorporada em corpos de prova de solo cimento em sua composição original e

sem a lavagem dos sais, a fim de se averiguar seu comportamento físico e mecânico, uma vez que não há registros na literatura acadêmica do uso deste material em materiais de construção.

5.3. Corrosividade

A corrosividade do resíduo foi verificada a partir da determinação do pH da lama, partindo dos ensaios recomendados pela norma de classificação de resíduos sólidos (NBR 10004, 2004). Segundo esta norma, um resíduo é classificado como corrosivo se apresentar pH inferior ou igual a 2, e superior ou igual a 12,5. Conforme indicado na **Tabela 12** a lama de salmoura apresentou pH 9,8, apresentando ser um material não corrosivo.

Tabela 12 – Teste de corrosividade (pH da lama)

Ensaio	Norma	Requisitos	Resultado obtido
pH	NBR 10004	≤ 2 ou $\geq 12,5$	9,8

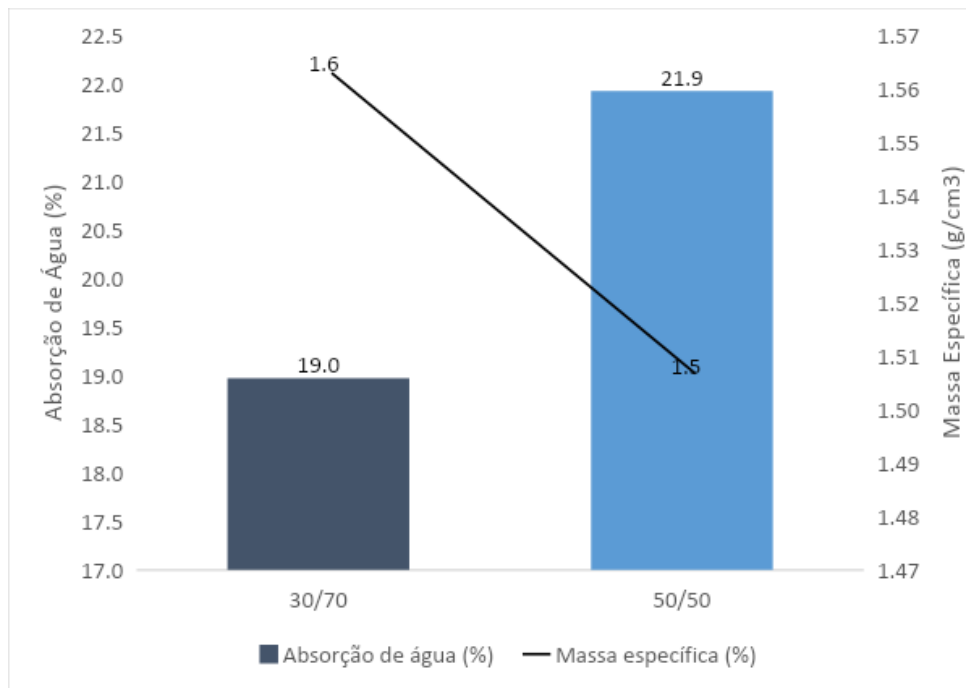
5.4. Absorção de água e massa específica.

Para os ensaios de absorção de água e massa específica foram separados 4 corpos de prova para cada traço com 7 dias de cura. Os valores médios e as recomendações da norma estão apresentados na **Tabela 13** e os resultados conjuntos do ensaio de absorção e da massa específica estão apresentados no gráfico representado pela **Tabela 1327**.

Tabela 13 - Resultados obtidos para absorção de água e compressão aos 7 dias.

Ensaio	Norma	Requisito	Traço	Resultados obtidos
Absorção (%)	NBR 10834	$\leq 20 \%$	30/70	19,0 %
			50/50	21,9 %

Figura 27 - Resultados ensaios de absorção de água e massa específica



A partir dos dados apresentados para absorção de água, pode-se observar que os corpos de prova com o traço 30/70 atenderam a exigência da NBR 10834 que recomenda valor médio menor ou igual a 20% e valores individuais menor ou igual a 22%. Mesmo os corpos de prova de traço 50/50 não terem se enquadrado nos valores estipulados pela norma, os mesmos apresentaram valores próximos ao recomendado dando uma maior margem para testar novos traços no futuro. Isso quer dizer que, com esses resultados, é possível testar traços com maiores quantidades de resíduo, podendo aumentar a capacidade de reaproveitamento do material, e ainda assim atender as exigências estabelecidas pela associação brasileira de normas técnicas

É importante destacar que mesmo com apenas 7 dias de cura, o traço 30/70 apresentou resultados que se enquadram na norma e o traço 50/50 apresentou resultados próximo ao recomendado. De acordo com LIMA (2009), conforme a idade dos tijolos aumenta, a hidratação do cimento continua evoluindo, o que reduz os vazios entre as partículas do solo e aumenta a sua densidade e resistência. Logo, pode-se inferir que corpos de prova com 28 dias de cura, terão alto potencial para alcançar resultados melhores que os obtidos neste estudo quanto à absorção de água.

5.5. Ensaio de Resistência à Compressão

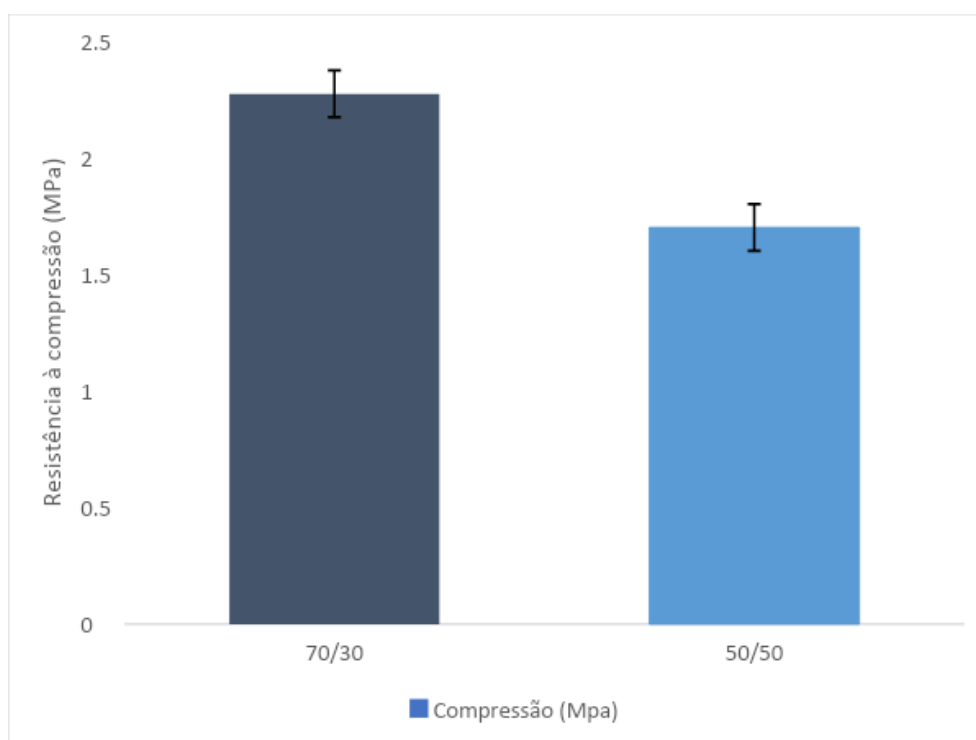
O ensaio de resistência à compressão foi realizado a partir do rompimento dos corpos de prova obtendo-se valores de tensão em MPa. Para este ensaio foram confeccionados 4 corpos de prova para cada traço com tempo de cura de 7 dias. Os valores médios e as recomendações da norma estão apresentados na **Tabela 14** e os valores de cada corpo de prova estão apresentados na (**Figura 28**).

Tabela 14 - Resultados ensaio de resistência à compressão

Ensaio	Norma	Requisito	Traço	Resultados obtidos
Compressão (Mpa)	NBR 10834	$\geq 2,0$	30/70	2,3 MPa
		MPa	50/50	1,7 MPa

O traço 30/70 apontou resistência à compressão de 2,3 MPa, atingindo valor superior ao valor mínimo recomendado pela norma NBR 10834 de 2,0 MPa, e o traço 50/50, obteve o valor médio de 1,7 MPa, não alcançando o valor mínimo recomendado.

Figura 28 - Ensaio de resistência à compressão



Através da **Figura 28** observa-se que, o aumento do teor de lama resulta em uma redução da resistência à compressão. Com o incremento do teor de resíduo, a quantidade de água

necessária para a obtenção da umidade ótima é maior, resultando no aumento da porosidade da amostra e consequentemente, redução da resistência.

No entanto, nota-se que a composição 30/70 atendeu as exigências da NBR 10834 (ABNT, 2013) quanto à resistência mecânica demonstrando ser uma proporção de solo arenoso e resíduo com potencial para compor o tijolo de solo cimento.

6. CONCLUSÕES

A caracterização dos materiais se mostraram complementares em suas propriedades. O solo arenoso é indicado para uso em tijolos ecológicos pois exige menor quantidade de cimento para sua estabilização, porém possui baixa coesão interna. Enquanto que a lama, material de partículas finas, contribui para dar coesão, facilitando assim a compactação e moldagem da mistura.

O traço 30/70 obteve resultados que atenderam as exigências das normas para fabricação de tijolos ecológicos para o ensaio de absorção de água e resistência à compressão, apresentando características físicas adequadas para aplicação em tijolos de solo cimento. Estes ensaios foram realizados com corpos de prova de 7 dias de cura. Logo, é importante realizar novos estudos com proporções de traços mais diversificadas, tendo este como referência, e com maior tempo de cura, a fim de encontrar o traço com maior índice de resistência mecânica dos tijolos.

Diante dos resultados obtidos do material com sua composição original de sais, é possível inferir que este resíduo tem potencial para compor tijolos ecológicos, porém, é preciso estudos mais aprofundados, a fim de analisar as características granulométricas e comportamento mecânico do resíduo lavado e com os teores de sais reduzidos para analisar seu comportamento por um período maior de tempo e diante da ação de intempéries.

6.1.1. Sugestões para estudos futuros

Para trabalhos futuros para este estudo, recomenda-se:

- Análise de durabilidade, realizando ensaios com tijolos com maior tempo de cura, a fim de observar a evolução da resistência mecânica.
- Estudo de metodologias viáveis de lavagem da lama para reduzir os teores de sais e, partir de então, comparar os resultados dos ensaios de absorção de água e resistência à compressão, com tijolos com altos e baixos teores de sais.
- Estudo da viabilidade econômica, análise de custos e logística operacional, a fim de tornar a aplicação da lama de salmoura em tijolos ecológicos viável e alcançável para a realidade de empresas que se interessem em adotar esta técnica no futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABICLOR, **Anuário Estatístico. Associação Brasileira da Indústria de Álcalis. Cloro e Derivados** (ABICLOR), São Paulo, SP, 2008.

ABNT, N. NBR 6457: **Amostras de Solo—Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização**. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT, N. NBR 6508: **grãos de solos que passam na peneira de 4, 8 mm: determinação da massa específica: método de ensaio**, 1984.

ABNT, N. NBR 7181—**Solo—Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1988.

ABNT, N. NBR 12024— **Solo-cimento—Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos—Procedimento**. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT, N. NBR 12025: **Solo-cimento—Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos—Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1990.

ABNT, N. NBR 10834: **Bloco de solo-cimento sem função estrutural — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT, N. NBR 10004: **Resíduos sólidos: classificação**. ABNT, 2004.

ANDRADE, José Eduardo Pessoa de; ZAPORSKI, Janusz. **A indústria de cloro-soda**. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTOS PORTLAND - ABCP, **Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais: prática recomendada**, S. Paulo, SP, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTOS PORTLAND – ABCP, **Fabricação de Tijolos de Solo-Cimento com a Utilização de Prensas Manuais**, S. Paulo, SP, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTOS PORTLAND – ABCP, **O solo-cimento e suas aplicações rurais**, S. Paulo, SP – BT-117, 1996.

AKAMATSU, Claudio; ROSS, Natiéli Cristina Mendes. **Estudo da aplicação para lodo de estação de tratamento de água na produção de tijolos ecológicos**. Bachelor's Thesis. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

BESSA, Sofia Araújo Lima et al. **Comportamento mecânico de alvenarias de terra com resíduos de construção e demolição**. MIX Sustentável, v. 5, n. 4, p. 53-62, 2019.

BRADY, Patrick V.; WALTHER, John V. **Controls on silicate dissolution rates in neutral and basic pH solutions at 25 C**. Geochimica et Cosmochimica acta, v. 53, n. 11, p. 2823-2830, 1989.

BOHNEN, Heloisa Haschel et al. **Estudo da substituição do agregado natural por resíduo de cerâmica vermelha em argamassa**. In: 6º SICT-Sul-Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense. 2017.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6.ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1987. 219p

Cartilha de tijolos ecológicos (2016)

CAZZONATTO, A. C.; NOLASCO, A. M.; ARMELIN, M. C. **Aproveitamento de resíduo da indústria de papel na fabricação de tijolo compactado**. 2004.

NBR 10.836/2013

CORRÊA, José Carlos. **Limites de consistência de solos da Amazônia Central e sua importância agrícola**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 17, n. 6, p. 917-921, 1982.

FERNANDES, Eduardo; GUIMARÃES, Bruna de Almeida; GLÓRIA, Ana Maria da Silva. **O setor de soda-cloro no Brasil e no mundo**. 2009.

GRANDE, Fernando Mazzeo. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. 2003. Tese de Doutorado.

HALE, Arthur James. **The applications of electrolysis in chemical industry**. Longmans, Green and Company, 1918.

IBAMA, **Ferramenta online de pesquisa sobre resíduos sólidos não urbanos no Brasil**. Disponível

em:

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojNjVkNmZhNjgtNTFjYS00NTEwLTkyZDQtNGE3Y2VINzc2MzdkIiwidCI6IjM5NTdhMzY3LTZkMzgtNGMxZi1hNGJhLTMzZThmM2M1NTBINyJ9>

INGLES, Owen G.; METCALF, John B. **Soil stabilization principles and practice**. 1972.

INMETRO. **Sal para consumo humano**. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/sal2.asp> , 2004.

JÚNIOR, Antônio Ramos Soares et al. **Estudo da incorporação do lodo de esgoto gerado em estações de tratamento de esgotos na formulação de tijolos ecológicos de solo-cimento**.

LOPES, Wilza Gomes Reis et al. **Solo-cimento reforçado com bambu: características físico-mecânicas**. 2002.

MACHADO, Amanda Ozório; DE ARAÚJO, Joice Andrade. **Avaliação de Tijolos Ecológicos Compostos por Lodo de Eta e Resíduos da Construção Civil**. 2014.

(BNDES, 1994).

MERCADO, Marta Chebel; PICARELLI, Marlene. **Solo-cimento: alguns aspectos referentes a sua produção e utilização em estudo de caso**. 1991. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

O'BRIEN, Thomas F.; BOMMARAJU, Tilak V.; HINE, Fumio. **Overview of the chlor-alkali industry**. In: **Handbook of Chlor-Alkali Technology**. Springer, Boston, MA, 2005. p. 37-74.

PRESA, Marcello Bastos. **Resistência à compressão e absorção de água em tijolos de solo-cimento**. 2011.

RODRIGUES, L. P.; HOLANDA, J. N. F. **Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento**. Cerâmica, 2013

RODRIGUES, Fabiana Passos. **Comparação da viabilidade tecnológica do tijolo ecológico em relação ao bloco de concreto**. Revista Científica UMC, v. 4, n. 3, 2019.

SILVA, Mauro Valério da. **Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de carvão e lodo provenientes de estação de tratamento de água.** PhD Thesis. Universidade de São Paulo, 2011.

SOUZA, Márcia IB; SEGANTINI, Antonio AS; PEREIRA, Joelma A. **Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 12, n. 2, p. 205-212, 2008. (ABCP BT-117, 1996).